



ภาคผนวก ก
ข้อมูลผลการทดลอง และข้อมูลที่ใช้ในการพล็อตกราฟ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลสำหรับรูป 4.1

T	h		
	water	methanol	acetone
50	185.770	708.932	605.205
60	821.791	1203.154	834.698
70	1361.626	1467.819	932.080
80	1856.600	1967.015	1232.420

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสำหรับรูป 4.2 และ 4.3

T	h			
	Methanol		Acetone	
	Zmodel	Zexp	Zmodel	Zexp
50	0.01178	0.03173	0.01264	0.03716
60	0.01079	0.01869	0.01302	0.02695
70	0.01101	0.01532	0.01535	0.02413
80	0.01248	0.01143	0.00930	0.01825
50	0.01156	0.02675	0.01283	0.03043
60	0.01076	0.01732	0.01297	0.02666
70	0.01080	0.01670	0.01454	0.02080
80	0.00957	0.01439	0.01082	0.01808

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสำหรับรูป 4.4 และ 4.16

filling ratio	angle (radien)	$Z_{3,noulesdu}$	z^f	z^a	z^{fa}	z^{a2}	$Z_{3,exp}$	Zmodel
0.25	1.5708	0.011351	0.326408	0.000881	0.172273	0.000016	0.003577	0.007337
0.25	1.5708	0.012114	0.331760	0.000976	0.176731	0.000019	0.003593	0.007382
0.25	1.5708	0.014384	0.346316	0.001278	0.189063	0.000028	0.003852	0.007504
0.25	1.5708	0.016518	0.358501	0.001588	0.199615	0.000040	0.003920	0.007603
0.25	1.5708	0.026543	0.403635	0.003345	0.240485	0.000129	0.004664	0.007954
0.25	1.5708	0.027369	0.406737	0.003510	0.243395	0.000139	0.004675	0.007978
0.5	1.5708	0.009992	0.099958	0.000721	0.026848	0.000012	0.005095	0.006962
0.5	1.5708	0.010164	0.100818	0.000740	0.027212	0.000012	0.005107	0.006975
0.5	1.5708	0.010589	0.102901	0.000790	0.028101	0.000013	0.005686	0.007005
0.5	1.5708	0.011008	0.104921	0.000839	0.028972	0.000015	0.005743	0.007034
0.5	1.5708	0.014060	0.118576	0.001233	0.035111	0.000027	0.007172	0.007218
0.5	1.5708	0.014048	0.118523	0.001231	0.035086	0.000027	0.007252	0.007218
0.25	1.5708	0.079409	0.530845	0.018703	0.369811	0.001930	0.007804	0.008829
0.25	1.5708	0.081599	0.534468	0.019520	0.373784	0.002064	0.008315	0.008852
0.25	0.5236	0.003829	0.248750	0.054261	0.482639	0.217461	0.009356	0.008774
0.25	0.5236	0.003691	0.246474	0.053227	0.480322	0.215279	0.009595	0.008761
0.5	0.5236	0.003707	0.060882	0.053349	0.230973	0.215537	0.011587	0.008452
0.25	0.5236	0.004264	0.255536	0.057408	0.489488	0.223974	0.011598	0.008814
0.5	0.3142	0.003688	0.060732	0.172028	0.414762	0.575250	0.012115	0.008800
0.25	0.7854	0.003681	0.246315	0.012255	0.332720	0.031519	0.012283	0.008270
0.5	1.3090	0.003704	0.060860	0.000657	0.025627	0.000068	0.013003	0.006844
0.5	1.0472	0.003683	0.060689	0.002827	0.053171	0.002143	0.013219	0.007406
0.5	1.3090	0.003943	0.062795	0.000713	0.026699	0.000076	0.013551	0.006882
0.5	0.7854	0.003690	0.060743	0.012278	0.110806	0.031565	0.013625	0.007949
0.5	0.7854	0.003984	0.063121	0.013041	0.114199	0.033096	0.013759	0.007987
0.5	0.5236	0.004000	0.063246	0.055520	0.235626	0.220087	0.013908	0.008484
0.25	0.7854	0.003965	0.250928	0.012991	0.337604	0.032995	0.014296	0.008303
0.5	1.0472	0.003985	0.063124	0.003070	0.055407	0.002336	0.014314	0.007449
0.25	1.3090	0.003992	0.251361	0.000724	0.164056	0.000078	0.014738	0.007217

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสำหรับรูป 4.4 และ 4.16 (ต่อ)

filling ratio	angle (radien)	$Z_{3,noul,esdu}$	z^f	z^a	z^{fa}	z^{a2}	$Z_{3,exp}$	Zmodel
0.5	1.5708	0.045935	0.214324	0.007916	0.088971	0.000500	0.014777	0.008181
0.5	1.5708	0.048689	0.220657	0.008674	0.093135	0.000577	0.015681	0.008231
0.25	1.3090	0.004300	0.256079	0.000798	0.168099	0.000088	0.015699	0.007259
0.25	1.0472	0.003976	0.251109	0.003063	0.235254	0.002331	0.015732	0.007773
0.25	0.3142	0.003679	0.246288	0.171896	0.643897	0.575111	0.016334	0.009096
0.5	0.7854	0.004200	0.064806	0.013592	0.116586	0.034189	0.016433	0.008012
0.5	0.3142	0.003859	0.062122	0.174490	0.417721	0.577824	0.016519	0.008817
0.25	0.7854	0.004607	0.260523	0.014616	0.347701	0.036196	0.017334	0.008369
0.5	0.5236	0.004309	0.065640	0.057722	0.240254	0.224616	0.017718	0.008515
0.5	1.0472	0.004386	0.066224	0.003394	0.058260	0.002595	0.018452	0.007503
0.25	0.3142	0.003922	0.250250	0.175378	0.647133	0.578745	0.019716	0.009116
0.5	0.5236	0.005415	0.073585	0.065058	0.255065	0.239137	0.020161	0.008612
0.5	0.7854	0.005745	0.075795	0.017384	0.131847	0.041477	0.020277	0.008168
0.5	1.3090	0.004450	0.066710	0.000835	0.028898	0.000093	0.020517	0.006957
0.25	1.3090	0.004731	0.262268	0.000905	0.173436	0.000104	0.021720	0.007315
0.5	1.0472	0.005761	0.075901	0.004516	0.067204	0.003500	0.023649	0.007658
0.25	0.3142	0.004687	0.261651	0.185476	0.656254	0.589014	0.024870	0.009171
0.5	0.3142	0.004242	0.065130	0.179753	0.423973	0.583243	0.027370	0.008851
0.25	1.0472	0.004412	0.257733	0.003416	0.241757	0.002613	0.029157	0.007827
0.25	1.0472	0.004940	0.265117	0.003845	0.249014	0.002957	0.032437	0.007885
c0	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	SD
90.0069	3.2199	-9.9786	3.9412	1.565	-5.4024	0.097069	1.756	0.206746

All rights reserved

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลสำหรับรูป 4.5

T	f	m	Tsco	Tsci	Tseo	Tsei	Tco	Teo	Tci	Tei	Qcd	h ₃
50	0	0.01923	33.99	30.90	50.04	50.79	40.49	47.70	36.67	39.80	248.250	708.932
60	0	0.01820	37.04	31.77	59.14	60.02	45.73	55.11	38.82	47.59	400.750	1203.154
70	0	0.01820	38.63	31.19	68.00	69.45	49.18	61.74	42.11	53.02	566.329	1467.819
80	0	0.01953	40.69	30.82	77.72	78.57	52.25	67.10	45.86	57.83	806.092	1967.015
50	8	0.01873	34.41	30.73	50.59	51.37	40.64	47.89	35.98	39.80	288.455	803.677
60	8	0.01870	36.95	31.15	59.65	60.77	45.71	55.24	38.91	47.63	452.934	1343.451
70	8	0.01820	39.39	30.90	69.22	70.67	49.77	62.51	42.28	53.33	646.209	1590.438
80	8	0.01953	40.51	30.35	77.62	78.57	52.08	67.09	44.95	57.55	830.408	1969.021
50	10	0.01923	34.74	30.58	50.83	51.63	40.76	48.01	36.43	40.08	334.339	950.657
60	10	0.01870	37.59	31.14	59.92	60.95	45.87	55.37	39.15	47.40	504.169	1430.617
70	10	0.01880	39.51	30.78	68.93	70.26	49.54	62.08	42.22	52.61	686.403	1637.717
80	10	0.01773	40.99	30.18	77.89	79.03	52.13	67.16	44.59	57.64	801.602	1905.494
50	14	0.01923	35.06	30.72	51.07	51.88	40.77	48.04	36.48	40.67	349.202	1069.844
60	14	0.01820	37.82	31.12	60.25	61.24	45.95	55.44	39.27	47.13	510.243	1386.054
70	14	0.01880	39.78	31.02	67.91	69.16	49.20	61.63	41.69	52.70	688.366	1567.569
80	14	0.01787	40.98	30.17	78.04	79.41	52.12	67.32	44.71	57.72	807.366	1904.395



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสำหรับรูป 4.7

T	f	m	Tsco	Tsci	Tseo	Tsei	Tco	Teo	Tci	Tei	Qcd	h ₃
50	0	0.0235	24.04	23.31	48.69	48.34	24.77	48.98	27.46	40.23	72.197	185.770
60	0	0.0236	28.08	24.64	57.78	58.11	34.77	54.98	34.82	45.68	338.749	821.791
70	0	0.0398	28.55	24.47	66.14	67.25	40.63	59.44	41.44	48.19	678.383	1361.626
80	0	0.0243	34.75	25.42	75.10	77.06	50.39	64.98	46.78	53.43	947.971	1856.600
50	8	0.0203	27.21	24.43	48.59	48.83	32.75	46.51	33.20	40.57	236.196	879.378
60	8	0.0093	34.28	24.16	57.67	58.17	42.27	54.24	39.79	46.30	392.378	1150.246
70	8	0.0234	30.18	23.88	63.08	64.68	43.56	57.04	44.07	48.11	615.497	1479.136
80	8	0.023	35.80	27.13	74.59	76.59	51.24	67.12	49.92	55.38	832.978	1594.899
50	10	0.0202	27.28	24.29	48.71	48.90	32.91	46.41	33.60	40.70	252.504	1022.339
60	10	0.0118	32.48	24.20	57.76	58.37	41.45	53.67	40.52	46.30	409.706	1216.231
70	10	0.0237	31.28	24.63	65.54	66.93	44.98	59.95	45.69	50.10	660.693	1498.022
80	10	0.0399	31.87	27.49	74.23	76.53	49.46	66.42	48.53	54.30	729.813	1381.187
50	14	0.0199	27.51	24.53	48.43	48.60	33.21	46.26	33.89	40.78	248.210	1060.508
60	14	0.0111	32.22	24.04	57.64	58.23	41.32	53.72	40.10	46.39	379.712	1131.551
70	14	0.0227	31.18	24.81	64.88	66.15	44.90	59.72	45.80	50.14	604.071	1413.006
80	14	0.0417	31.36	27.24	75.89	78.32	50.33	67.49	49.15	55.04	717.446	1301.360

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลสำหรับรูป 4.8

T	Q (W)			P (W)		
	0 -8 kHz	0 -10 kHz	0 -14 kHz	6.41	27.94	65.85
50	164.000	180.307	176.013	25.585	6.453	2.673
60	53.629	70.958	40.963	8.367	2.540	0.622
70	-62.886	-17.689	-74.311	-9.811	-0.633	-1.128
80	-114.994	-218.158	-230.526	-17.940	-7.808	-3.501

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสำหรับรูป 4.9

T	Q (W)			P (W)		
	0 -8 kHz	0 -10 kHz	0 -14 kHz	6.41	27.94	65.85
50	40.205	86.090	100.953	6.272	3.081	1.533
60	52.184	103.419	109.493	8.141	3.701	1.663
70	79.880	120.074	122.037	12.462	4.298	1.853
80	24.316	-4.490	1.273	3.793	-0.161	0.019

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลสำหรับรูป 4.10

T	Q (W)			P (W)		
	0 -8 kHz	0 -10 kHz	0 -14 kHz	6.41	27.94	65.85
50	11.566	46.602	57.574	1.804	1.668	0.874
60	52.856	30.174	29.945	8.246	1.080	0.455
70	72.147	83.064	37.910	11.255	2.973	0.576
80	1.057	-16.671	-11.883	0.165	-0.597	-0.180

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสำหรับรูป 4.11

T	he		
	30%	50%	100%
50	316.57	185.77	792.67
60	611.27	821.79	1267.70
70	1700.41	1361.63	1659.84
80	1870.16	1856.60	1729.81

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลสำหรับรูป 4.12

มุม	T	f	m	Tsco	Tsci	Tseo	Tsei	Tco	Teo	Tci	Tei	Qcd	h
18	50	0	0.0167	28.16	25.18	50.68	50.32	34.36	46.49	32.60	44.30	208.279	239.546
18	60	0	0.0168	31.33	26.02	57.90	57.77	41.46	52.38	37.76	48.53	373.880	904.394
18	70	0	0.0173	34.12	26.55	65.09	67.10	47.16	59.15	42.82	54.17	547.582	1140.805
18	80	0	0.0172	36.91	26.74	73.77	76.53	51.11	65.88	48.11	59.99	731.632	1377.019
18	50	8	0.0167	28.72	25.43	50.52	50.74	35.94	46.65	33.23	41.56	229.030	680.833
18	60	8	0.0168	31.50	26.10	57.87	57.64	41.66	53.42	37.54	47.90	379.951	893.773
18	70	8	0.0173	34.18	26.40	64.80	66.79	47.37	59.23	42.14	53.73	562.908	1179.424
18	80	8	0.0172	37.18	26.84	73.75	76.40	52.17	65.47	46.65	58.91	743.975	1406.162
30	50	0	0.0172	28.25	25.50	50.68	50.29	33.83	46.52	31.83	41.35	197.479	207.385
30	60	0	0.0179	29.02	25.85	58.72	57.81	29.19	55.80	29.24	50.15	237.468	1939.240
30	70	0	0.0173	34.41	26.27	64.64	66.85	47.37	59.08	42.60	54.04	588.706	2404.015
30	80	0	0.0172	37.09	26.71	72.95	76.11	52.51	65.93	47.12	59.75	746.688	2344.090
30	50	8	0.0172	28.55	25.48	50.17	51.11	35.04	46.59	32.42	42.36	221.002	1396.094
30	60	8	0.0179	31.10	26.10	57.78	57.69	41.38	52.50	37.44	48.01	375.164	2030.349
30	70	8	0.0173	34.59	26.82	65.89	66.72	47.63	59.43	42.53	53.77	561.804	2270.009
30	80	8	0.0172	37.37	26.77	73.51	76.46	51.59	66.46	46.99	59.17	762.681	2052.346
45	50	0	0.0346	23.64	22.63	49.05	53.08	24.23	47.56	27.70	38.85	146.025	377.623
45	60	0	0.0155	31.54	24.02	57.81	58.09	40.25	54.51	38.21	47.73	487.377	1297.556
45	70	0	0.0219	31.67	25.82	66.00	66.09	48.04	59.07	44.61	53.45	536.274	1573.345
45	80	0	0.0160	38.73	25.73	75.88	76.67	51.76	66.63	49.88	59.97	868.006	1831.191
45	50	8	0.0346	24.86	23.25	48.57	49.09	30.48	44.94	30.89	38.98	233.147	882.480
45	60	8	0.0155	31.66	24.01	57.65	58.10	40.11	54.36	37.97	47.36	495.952	1181.539
45	70	8	0.0219	32.13	25.47	65.45	65.51	43.70	57.77	40.88	49.40	610.707	1562.361
45	80	8	0.0160	38.78	25.79	76.77	77.41	51.76	67.60	48.91	59.44	866.901	1804.571
60	50	0	0.0219	25.74	25.26	49.22	49.12	26.56	48.40	30.66	42.54	43.203	165.811
60	60	0	0.0215	28.87	23.49	55.73	56.31	37.64	52.24	37.12	42.41	482.861	693.410
60	70	0	0.0219	31.87	25.33	66.86	65.95	43.85	58.13	41.48	50.58	599.750	771.408
60	80	0	0.0160	38.73	25.93	76.51	76.81	51.94	67.86	48.95	60.34	855.083	1429.672
60	50	8	0.0219	27.15	25.00	48.49	49.13	32.12	45.89	33.23	40.30	197.177	637.198
60	60	8	0.0215	29.98	24.40	57.86	57.95	39.19	52.80	38.32	42.78	501.165	720.274

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลสำหรับรูป 4.12 (ต่อ)

มุม	T	f	m	Tsco	Tsci	Tseo	Tsei	Tco	Teo	Tci	Tei	Qcd	h
60	70	8	0.0219	32.10	25.52	66.09	66.22	44.19	58.35	41.03	50.63	603.689	788.664
60	80	8	0.0160	38.84	26.28	76.29	76.41	51.71	67.34	47.66	59.37	838.535	1022.334
75	50	0	0.0132	25.06	23.92	48.28	47.82	26.20	47.28	28.00	40.59	62.747	227.229
75	60	0	0.0213	29.61	24.66	59.82	60.61	40.84	54.80	40.95	48.03	441.701	1035.536
75	70	0	0.0207	32.71	25.25	65.59	66.80	45.45	60.10	46.70	53.49	645.503	1432.742
75	80	0	0.0207	35.39	25.38	75.32	77.43	51.25	66.69	50.22	58.44	866.547	1526.124
75	50	8	0.0132	27.50	24.18	48.51	48.52	32.44	46.43	32.65	40.38	183.858	488.764
75	60	8	0.0213	30.07	24.81	57.95	58.52	39.57	53.45	39.78	45.81	469.279	873.448
75	70	8	0.0207	32.95	25.23	65.61	66.67	45.49	59.76	45.53	50.22	668.599	1000.893
75	80	8	0.0207	35.23	25.25	75.09	77.14	51.04	66.98	49.75	55.96	864.490	1154.340
90	50	0	0.0235	24.04	23.31	48.69	48.34	24.77	48.98	27.46	40.23	72.197	185.770
90	60	0	0.0236	28.08	24.64	57.78	58.11	34.77	54.98	34.82	45.68	338.749	821.791
90	70	0	0.0398	28.55	24.47	66.14	67.25	40.63	59.44	41.44	48.19	678.383	1361.626
90	80	0	0.0243	34.75	25.42	75.10	77.06	50.39	64.98	46.78	53.43	947.971	1856.600
90	50	8	0.0203	27.21	24.43	48.59	48.83	32.75	46.51	33.20	40.57	236.196	879.378
90	60	8	0.0093	34.28	24.16	57.67	58.17	42.27	54.24	39.79	46.30	392.378	1150.246
90	70	8	0.0234	30.18	23.88	63.08	64.68	43.56	57.04	44.07	48.11	615.497	1479.136
90	80	8	0.0230	35.80	27.13	74.59	76.59	51.24	67.12	49.92	55.38	832.978	1594.899

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลสำหรับรูป 4.13

มุม	T	f	m	Tsco	Tsci	Tseo	Tsei	Tco	Teo	Tci	Tei	Qcd	h
18	50	0	0.0207	29.12	26.42	50.89	50.07	27.29	44.57	30.21	36.29	233.721	1076.097
18	60	0	0.0211	32.60	27.25	60.49	61.29	42.72	53.08	34.77	43.88	471.271	1424.639
18	70	0	0.0213	35.80	28.03	68.35	69.52	48.02	60.43	42.89	51.86	692.365	1733.047
18	80	0	0.0203	40.13	29.52	75.71	77.47	53.37	64.65	48.81	55.12	898.451	1891.961
18	50	8	0.0207	29.74	26.69	51.59	50.96	34.86	45.28	29.86	39.74	263.804	1246.607
18	60	8	0.0211	32.20	27.29	60.05	60.48	41.44	53.02	35.47	46.15	433.261	1661.921
18	70	8	0.0213	35.86	28.10	68.81	69.54	48.13	60.46	42.91	51.44	691.317	1807.763
18	80	8	0.0203	39.98	29.33	76.07	78.10	53.24	64.94	47.79	54.15	902.125	2155.199
30	50	0	0.0202	30.20	27.58	50.65	50.35	35.71	45.97	30.47	39.45	221.590	895.058
30	60	0	0.0204	32.36	27.19	59.54	60.01	42.87	52.46	35.45	45.02	440.646	1251.965
30	70	0	0.0199	34.85	27.98	66.91	67.82	47.92	58.30	42.65	50.90	572.835	1704.508
30	80	0	0.0188	40.04	29.41	74.84	76.65	53.37	64.47	47.49	56.11	837.201	1958.758
30	50	8	0.0202	30.39	27.41	51.38	50.64	35.36	46.50	30.00	40.14	252.513	1299.265
30	60	8	0.0204	31.95	27.16	60.38	60.54	42.20	52.75	35.28	45.37	408.753	1691.723
30	70	8	0.0199	35.12	28.15	162.52	68.65	48.40	58.87	42.15	51.16	581.093	1860.524
30	80	8	0.0188	40.95	29.45	77.23	79.32	54.73	66.13	47.18	55.66	906.323	2090.480
45	50	0	0.0200	30.40	27.75	50.94	50.55	35.16	44.11	30.66	38.70	221.959	1115.620
45	60	0	0.0201	34.07	27.54	59.81	60.22	44.00	53.13	35.04	43.67	549.876	1269.432
45	70	0	0.0212	35.58	28.71	66.41	67.62	48.19	58.66	42.83	51.25	608.337	1617.264
45	80	0	0.0198	40.65	29.57	76.03	77.88	54.45	64.95	47.58	55.27	916.526	1941.221
45	50	8	0.0200	30.36	27.61	51.19	50.79	34.78	44.73	30.19	40.08	230.201	1433.769
45	60	8	0.0201	33.98	27.57	60.30	60.60	43.07	53.37	34.57	43.76	540.426	1929.960
45	70	8	0.0212	35.46	28.63	67.24	68.28	48.70	58.68	42.77	50.23	604.448	1948.993
45	80	8	0.0198	40.80	29.62	76.81	78.72	54.80	65.82	47.28	55.04	924.546	1933.184
60	50	0	0.0196	30.33	27.90	51.54	50.61	29.00	50.05	28.57	40.57	199.178	1109.256
60	60	0	0.0196	33.54	27.90	59.16	59.63	43.44	52.76	34.47	44.03	461.466	1368.746
60	70	0	0.0197	36.24	28.62	66.81	67.64	48.75	58.65	43.15	50.15	626.066	1634.754
60	80	0	0.0204	40.68	29.34	76.64	79.03	54.99	65.82	46.01	52.70	967.698	1650.750
60	50	8	0.0196	30.54	27.69	51.53	50.76	34.97	46.84	30.38	42.10	233.212	1366.503
60	60	8	0.0196	33.80	28.11	60.31	60.57	43.56	53.59	34.78	45.91	465.643	1707.695

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลสำหรับรูป 4.13 (ต่อ)

มุม	T	f	m	Tsco	Tsci	Tseo	Tsei	Tco	Teo	Tci	Tei	Qcd	h
60	70	8	0.0197	36.45	28.74	67.42	68.26	49.05	58.90	42.53	50.13	634.132	1791.324
60	80	8	0.0204	40.61	29.16	76.84	79.13	54.93	65.83	46.03	52.46	976.275	1878.611
75	50	0	0.0206	30.27	27.87	50.94	50.49	34.78	47.37	30.98	41.32	207.200	951.071
75	60	0	0.0193	34.23	28.91	59.47	59.80	43.43	53.32	35.05	44.95	430.025	1218.928
75	70	0	0.0195	37.47	29.26	68.17	69.32	50.27	60.17	41.92	50.21	669.768	1571.387
75	80	0	0.0210	39.69	29.26	76.31	78.53	54.54	65.61	46.24	53.85	915.924	1701.478
75	50	8	0.0206	30.63	27.84	51.57	50.70	34.88	47.14	30.60	41.43	240.705	1409.607
75	60	8	0.0193	34.48	28.53	60.25	60.56	43.86	53.79	34.54	44.89	480.316	1513.262
75	70	8	0.0195	37.95	29.67	68.60	69.74	50.59	60.40	43.03	50.68	675.595	1665.064
75	80	8	0.0210	39.44	29.27	76.77	79.02	54.71	65.73	46.42	53.86	892.786	1760.951
90	50	0	0.0164	28.92	26.86	49.57	49.23	32.34	48.06	31.26	41.60	140.528	552.746
90	60	0	0.0213	34.03	29.13	59.48	60.05	44.38	54.67	38.71	48.48	437.736	1096.292
90	70	0	0.0175	39.08	29.92	68.90	70.22	51.75	62.12	45.43	54.97	671.198	1659.841
90	80	0	0.0188	40.22	29.54	76.24	78.83	55.42	66.83	48.09	58.39	839.326	1729.813
90	50	8	0.0164	29.09	26.35	49.62	49.67	34.79	47.23	31.90	41.35	187.374	792.627
90	60	8	0.0213	34.45	29.33	59.94	60.56	44.53	54.80	38.71	48.69	457.199	1267.602
90	70	8	0.0180	38.06	29.62	67.42	68.43	50.64	60.71	43.46	53.64	635.542	1664.440
90	80	8	0.0188	40.03	29.53	75.99	78.85	55.41	66.79	47.27	57.97	826.261	1611.779

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลสำหรับรูป 4.14

filling ratio	angle (radien)	wave (kHz/kHz _{max})	$Z_{3,noul}$	$Z_{3,ul}$	Zmodel
0.5	1.571	0.5714	0.01178	0.02799	0.01214
0.5	1.571	0.5714	0.01079	0.01674	0.01140
0.5	1.571	0.5714	0.01101	0.01414	0.01157
0.5	1.571	0.5714	0.01248	0.01142	0.01264
0.5	1.571	0.7143	0.01178	0.02366	0.01183
0.5	1.571	0.7143	0.01079	0.01572	0.01112
0.5	1.571	0.7143	0.01101	0.01373	0.01128
0.5	1.571	0.7143	0.01248	0.01180	0.01233
0.5	1.571	1.0000	0.01178	0.02102	0.01139
0.5	1.571	1.0000	0.01079	0.01623	0.01070
0.5	1.571	1.0000	0.01101	0.01435	0.01086
0.5	1.571	1.0000	0.01248	0.01181	0.01187
c0 = 0.26999					
c1 = -0.11323					
c2 = 0.71271					

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลสำหรับรูป 4.15

filling ratio	angle (radien)	wave (kHz/kHzmax)	$Z_{3,noul}$	$Z_{3,ul}$	Zmodel
0.5	1.571	0.5714	0.01264	0.03424	0.02415
0.5	1.571	0.5714	0.01302	0.02665	0.02475
0.5	1.571	0.5714	0.01535	0.02160	0.02830
0.5	1.571	0.5714	0.00930	0.01807	0.01880
0.5	1.571	0.7143	0.01264	0.03154	0.02225
0.5	1.571	0.7143	0.01302	0.02710	0.02281
0.5	1.571	0.7143	0.01535	0.02125	0.02608
0.5	1.571	0.7143	0.00930	0.01851	0.01733
0.5	1.571	1.0000	0.01264	0.02804	0.01968
0.5	1.571	1.0000	0.01302	0.02718	0.02017
0.5	1.571	1.0000	0.01535	0.02256	0.02307
0.5	1.571	1.0000	0.00930	0.01887	0.01532
c0 = 0.69934					
c1 = -0.36551					
c2 = 0.81684					

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลสำหรับรูป 4.16

filling ratio	angle (radien)	wave (kHz/kHzmax)	Z3,noul	a ^f	z ^f	z ^a	a ^w	z ^w	Z3,ul	Z model
0.25	0.314	0.5714	0.00368	0.74866	0.24629	0.17190	0.51601	0.04065	0.01600	0.01923
0.25	0.314	0.5714	0.00392	0.74866	0.25025	0.17538	0.51601	0.04216	0.01907	0.01909
0.25	0.314	0.5714	0.00469	0.74866	0.26165	0.18548	0.51601	0.04667	0.03304	0.01869
0.25	0.524	0.5714	0.00369	0.85065	0.24647	0.05323	0.69092	0.04072	0.01108	0.02088
0.25	0.524	0.5714	0.00426	0.85065	0.25554	0.05741	0.69092	0.04422	0.01611	0.02045
0.25	0.785	0.5714	0.00368	0.94140	0.24632	0.01226	0.87107	0.04066	0.02549	0.02378
0.25	1.047	0.5714	0.00398	1.01160	0.25111	0.00306	1.02670	0.04249	0.02852	0.02701
0.25	1.047	0.5714	0.00441	1.01160	0.25773	0.00342	1.02670	0.04509	0.03123	0.02644
0.25	1.047	0.5714	0.00494	1.01160	0.26512	0.00385	1.02670	0.04810	0.03530	0.02583
0.25	1.309	0.5714	0.00473	1.06963	0.26227	0.00090	1.16633	0.04693	0.04602	0.03006
0.25	1.571	1.0000	0.01135	1.11952	0.32641	0.00088	1.57080	0.01135	0.01608	0.01688
0.25	1.571	0.5714	0.01211	1.11952	0.33176	0.00098	1.29440	0.08030	0.01543	0.02705
0.25	1.571	0.7143	0.01438	1.11952	0.34632	0.00128	1.38066	0.04833	0.01955	0.02344
0.25	1.571	1.0000	0.01652	1.11952	0.35850	0.00159	1.57080	0.01652	0.01849	0.01775
0.25	1.571	0.5714	0.02654	1.11952	0.40363	0.00334	1.29440	0.12572	0.01995	0.02191
0.25	1.571	0.5714	0.02737	1.11952	0.40674	0.00351	1.29440	0.12794	0.02572	0.02173
0.25	1.571	0.7143	0.07941	1.11952	0.53084	0.01870	1.38066	0.16375	0.02205	0.01863
0.25	1.571	1.0000	0.08160	1.11952	0.53447	0.01952	1.57080	0.08160	0.02132	0.02197
0.5	0.314	0.5714	0.00369	0.56050	0.06073	0.17203	0.51601	0.04070	0.01044	0.01336
0.5	0.314	0.5714	0.00386	0.56050	0.06212	0.17449	0.51601	0.04177	0.01244	0.01360
0.5	0.314	0.5714	0.00424	0.56050	0.06513	0.17975	0.51601	0.04409	0.01353	0.01412
0.5	0.314	0.5714	0.00371	0.56050	0.06088	0.17230	0.51601	0.04082	0.01804	0.01338
0.5	0.524	0.5714	0.00400	0.72360	0.06325	0.05552	0.69092	0.04263	0.01076	0.01247
0.5	0.524	0.5714	0.00431	0.72360	0.06564	0.05772	0.69092	0.04448	0.01209	0.01282
0.5	0.524	0.5714	0.00541	0.72360	0.07358	0.06506	0.69092	0.05069	0.01330	0.01397
0.5	0.524	0.5714	0.00369	0.72360	0.06074	0.05322	0.69092	0.04071	0.01731	0.01210
0.5	0.785	0.5714	0.00398	0.88623	0.06312	0.01304	0.87107	0.04254	0.01154	0.01225
0.5	0.785	0.5714	0.00420	0.88623	0.06481	0.01359	0.87107	0.04384	0.01165	0.01247
0.5	0.785	0.5714	0.00574	0.88623	0.07579	0.01738	0.87107	0.05243	0.01569	0.01388

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลสำหรับรูป 4.16 (ต่อ)

filling ratio	angle (radien)	wave (kHz/kHzmax)	Z3,noul	a ^f	z ^f	z ^a	a ^w	z ^w	Z3,ul	Z model
0.5	1.047	0.5714	0.00368	1.02333	0.06069	0.00283	1.02670	0.04067	0.01197	0.01242
0.5	1.047	0.5714	0.00398	1.02333	0.06312	0.00307	1.02670	0.04254	0.01256	0.01273
0.5	1.047	0.5714	0.00439	1.02333	0.06622	0.00339	1.02670	0.04494	0.01317	0.01311
0.5	1.047	0.5714	0.00576	1.02333	0.07590	0.00452	1.02670	0.05251	0.01646	0.01428
0.5	1.309	0.5714	0.00370	1.14411	0.06086	0.00066	1.16633	0.04080	0.01277	0.01336
0.5	1.309	0.5714	0.00394	1.14411	0.06279	0.00071	1.16633	0.04229	0.01351	0.01360
0.5	1.309	0.5714	0.00445	1.14411	0.06671	0.00084	1.16633	0.04531	0.01486	0.01406
0.5	1.309	0.5714	0.00999	1.14411	0.09996	0.00241	1.16633	0.07193	0.01596	0.01764
0.5	1.571	0.5714	0.01016	1.25331	0.10082	0.00074	1.29440	0.07264	0.01351	0.01879
0.5	1.571	0.5714	0.01059	1.25331	0.10290	0.00079	1.29440	0.07436	0.01774	0.01898
0.5	1.571	0.7143	0.01101	1.25331	0.10492	0.00084	1.38066	0.03992	0.01718	0.01678
0.5	1.571	1.0000	0.01405	1.25331	0.11852	0.00123	1.57080	0.01405	0.01475	0.01360
0.5	1.571	0.5714	0.01406	1.25331	0.11858	0.00123	1.29440	0.08744	0.02838	0.02037
0.5	1.571	0.7143	0.04593	1.25331	0.21432	0.00792	1.38066	0.11076	0.02869	0.02899
0.5	1.571	1.0000	0.04869	1.25331	0.22066	0.00867	1.57080	0.04869	0.02928	0.03055
c0	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	
1.0236	3.0621	-2.0927	0.93505	-1.1345	-1.4207	2.0691	-0.11994	4.0844	0.93942	



ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตัวอย่างการคำนวณ

ใช้น้ำที่ 50% ของส่วนทำระเหยเป็นสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส ทำมุม 90 องศาจากแนวระนาบ มีขั้นตอนการคำนวณ ดังต่อไปนี้

1. ส่วนควบแน่น

$$\text{เมื่อ } \dot{m}_w = 0.0243 \text{ kg/s}$$

$$C_p = 4182 \text{ kJ/Kg} \cdot \text{K}$$

$$T_{sc,out} = 323.39 \text{ K}$$

$$T_{sc,in} = 319.78 \text{ K}$$

$$1.1 \text{ หา } \dot{Q}_c$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_w C_p (T_{sc,out} - T_{sc,in})$$

$$\dot{Q}_c = 0.0243 \times 4182 (323.39 - 319.78)$$

$$\dot{Q}_c = 947.971 \text{ W}$$

2. ส่วนทำระเหย

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_e$$

$$\dot{Q}_e = \frac{T_{eo} - T_{ei}}{Z_2 + Z_3}$$

$$\text{เมื่อ } D_o = 30.35 \text{ mm}$$

$$D_i = 27.75 \text{ mm}$$

$$k_{cu} = 398.74 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$L_e = 0.5 \text{ m}$$

$$T_{eo} = 337.98 \text{ K}$$

$$T_{ei} = 326.43 \text{ K}$$

$$Z_2 = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k_{cu} L_e}$$

$$Z_2 = \frac{\ln\left(\frac{30.35}{27.75}\right)}{2\pi \times 398.74 \times 0.5}$$

$$Z_2 = 7.01 \times 10^{-5} \text{ K / W}$$

2.1 หาค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อน Z_3

$$Z_3 = \frac{T_{eo} - T_{ei}}{\dot{Q}_e} - Z_2$$

$$Z_3 = \frac{337.98 - 326.43}{947.971} - 7.01 \times 10^{-5}$$

$$Z_3 = 0.01211 \text{ K / W}$$

2.2 หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อความร้อน h_{ei}

$$Z_3 = \frac{1}{h_{ei} A_i}$$

$$h_{ei} = \frac{1}{Z_3 A_i}$$

$$h_{ei} = \frac{1}{0.01211 \times 0.04446}$$

$$h_{ei} = 1856.6 \text{ J / kg}$$

3 คำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน Z_3 จาก ESDU

$$F = 0.5, \mu_l = 0.0005195 \text{ Ns / m}^2, Cp_l = 4186.37 \text{ J / kg} \cdot \text{K}$$

$$\rho_l = 982.766 \text{ kg / m}^3, \rho_v = 0.0994 \text{ kg / m}^3, k_l = 0.6456 \text{ W / m} \cdot \text{K}$$

$$P_v = 12537.75 \text{ Pa}, P_a = 101000 \text{ Pa}, q_{latent} = 2375772.3 \text{ J / kg}$$

$$\Phi_2 = \left(\frac{q_{latent} k^3 \rho_l^2}{\mu_l} \right)^{1/4}$$

$$\Phi_2 = 5880.018 \text{ kg / (k}^{2/4} \text{s}^{5/2})$$

$$Z_{3f} = \frac{C \dot{Q}^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} L_e \Phi_2^{4/3}}; C = 0.235$$

$$Z_{3f} = 0.00242 \text{ K / W}$$

$$\Phi_3 = 0.32 \frac{\rho_l^{0.65} k_l^{0.3} C p_l^{0.7}}{\rho_v^{0.25} q_{latent}^{0.4} \mu_l^{0.1}} \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23}$$

$$\Phi_3 = 56.115$$

$$Z_{3p} = \frac{1}{\Phi_3 g^{0.2} \dot{Q}^{0.4} (\pi D_i L_e)^{0.6}}$$

$$Z_{3p} = 0.0048 \text{ K/W}$$

$$Z_3 = Z_{3p} \quad \text{if } Z_{3p} < Z_{3f}$$

$$Z_3 = Z_{3p} F + Z_{3f} (1 - F)$$

$$Z_{3,ESDU} = 0.00359 \text{ K/W}$$

4. คำนวณค่า Z_3 จากสมการที่พัฒนาขึ้นใหม่

$$Z_{3,noul,model} = 90.0069 \cdot (F)^{3.2199} \cdot (\beta)^{-9.9786} \cdot (Z_{3,noul,ESDU})^Y$$

$$Y = 3.9412 + 1.565F - 5.4024F^2 + 0.09707F\beta + 1.756\beta^2$$

$$F = 0.25, \beta = 1.57, Z_{3,noul,ESDU} = 0.0274 \text{ K/W}$$

$$Z_{3,noul,model} = 0.00524 \text{ K/W}$$

5. คำนวณหาค่าเมื่อป้อนคลื่นอุลตราให้กับท่อความร้อน

$$\text{เมื่อ } \frac{f}{f_{\max}} = 1$$

$$Z_{3,ul} = 0.99306 \cdot (F)^{2.7262} \cdot (\beta)^M \cdot (Z_{3,noul})^N \cdot \left(\frac{f}{f_{\max}} \right)^{-1.6056}$$

$$M = -0.22133F + 1.1821 \frac{f}{f_{\max}} - 0.64467$$

$$N = 2.052F - 0.03906\beta - 1.6056 \frac{f}{f_{\max}} + 0.005136$$

$$Z_{3,ul} = 0.0217 \text{ K/W}$$



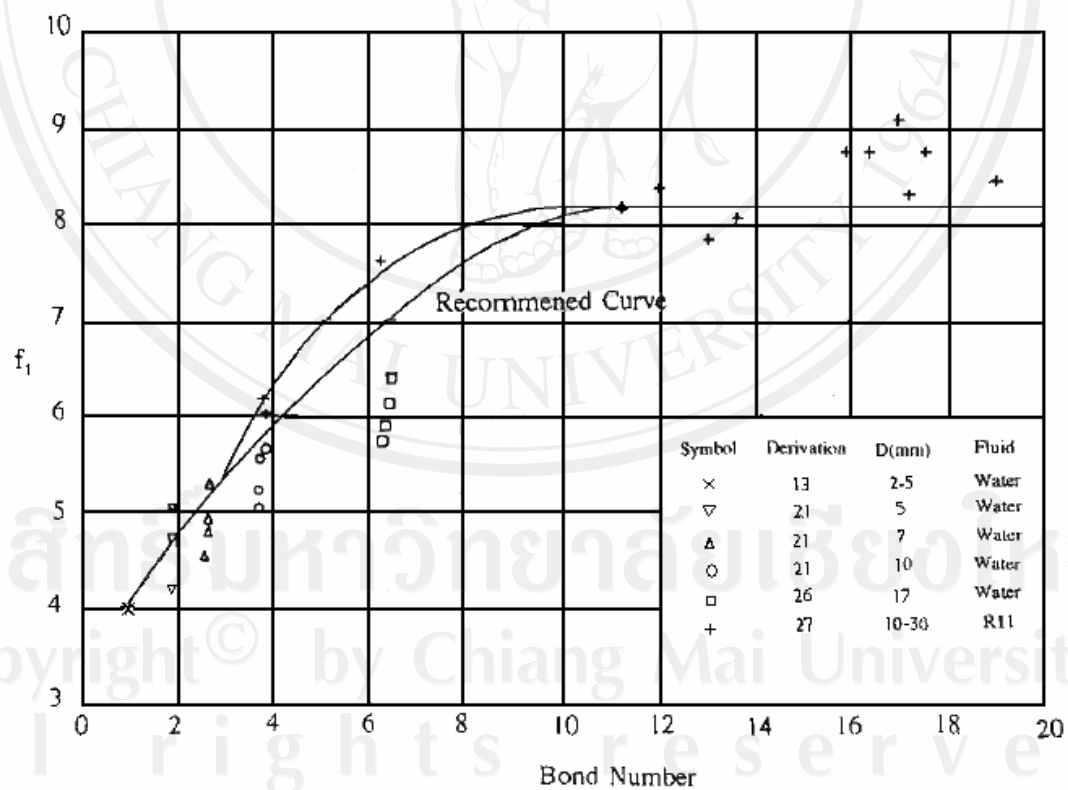
ภาคผนวก ค
ตารางคุณสมบัติทางความร้อนของท่อโลหะ และสารทำงาน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ ค.1 Thermophysical Properties of Copper

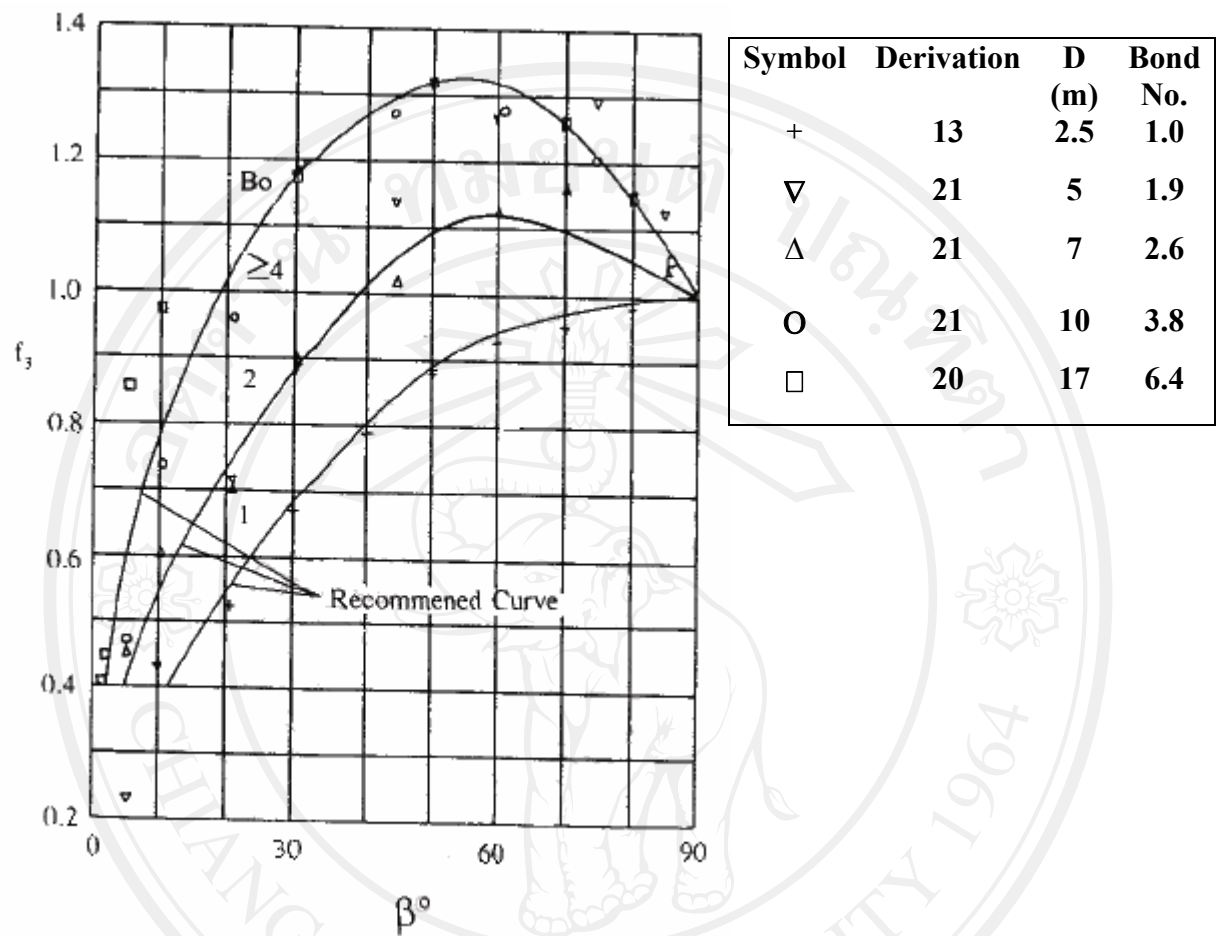
T	ρ	c	k_l
Temp.	Density	Specific Heat	Thermal Conductivity
(K)	(kg/m ³)	(J / kg.K)	(W / m.K)
100	9009	0.254	480
150	8992	0.323	429
200	8973	0.357	413
250	8951	0.377	406
300	8930	0.386	401
400	8884	0.396	393
600	8787	0.431	379
800	8642	0.448	366
1000	8568	0.446	352
1200	8458	0.48	339

ที่มา; Heat Pipe Science and Technology



รูปที่ ค.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขบอนด์กับ f_1

ที่มา; Engineering Sciences Data 81038. (1981)



รูปที่ ค.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของท่อกับค่า f_3
 ที่มา; Engineering Sciences Data 81038. (1981)

ตารางที่ ค.2 Thermophysical Properties on the Saturation Line of Methanol

METHANOL												
Thermophysical Properties on the Saturation Line												
t	Uncertainty $\left(\frac{dt}{dp}\right)_{sp}$	p	ρ_l	ρ_v	h_f	h_{fg}	h_g	μ_l	μ_v	λ_l	σ	ϕ_1
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	Pa	kg/m^3	kg/m^3	J/kg	J/kg	J/kg	N s/m^2	N s/m^2	W/(m K)	N/m	W/m^2
-97.36	5.000	1.814E-1	900.3	3.9510E-6	1274C3	2.172C3	12.33E-3	5.681E-6	0.2396	0.2396	29.32E-3	0.27E10
-90	5.000	5.965E-1	893.0	1.2573E-5	1272C3	2.170C3	8.609E-3	5.907E-6	0.2369	0.2369	29.03E-3	0.30E10
-80	4.000	2.47E0	883.5	4.9723E-5	1269C3	2.167C3	5.607E-3	6.218E-6	0.2333	0.2333	28.61E-3	0.36E10
-70	3.000	0.8375	874.1	1.6897E-4	1265C3	2.200C3	3.970E-3	6.538E-6	0.2298	0.2298	28.16E-3	0.70E10
-60	2.000	2.7769E1	864.7	5.0496E-4	1260C3	2.215C3	2.908E-3	6.065E-6	0.2263	0.2263	27.68E-3	1.09E10
-50	1.000	7.8124E1	855.4	1.3822E-3	1254C3	2.234C3	2.208E-3	7.196E-6	0.2229	0.2229	27.17E-3	1.38E10
-40	0.500	1.9966E2	846.2	3.2950E-3	1247C3	2.257C3	1.724E-3	7.531E-6	0.2196	0.2196	26.62E-3	1.63E10
-30	0.200	4.6918E2	837.0	7.3993E-3	1239C3	2.283C3	1.201E-3	8.867E-6	0.2163	0.2163	26.04E-3	1.96E10
-20	0.100	1.0242E3	827.9	1.5476E-2	1230C3	2.313C3	8.295E-4	8.205E-6	0.2131	0.2131	25.47E-3	2.29E10
-10	0.090	2.0931E3	818.7	3.0415E-2	1220C3	2.340C3	0.930E-3	0.943E-6	0.2099	0.2099	24.70E-3	2.64E10
0	0.080	4.0455E3	809.3	5.6591E-2	1209C3	2.380C3	0.791E-3	0.089E-6	0.2068	0.2068	24.10E-3	2.90E10
10	0.070	7.4211E3	800.3	1.0033E-1	1197C3	2.433C3	0.674E-3	9.221E-6	0.2038	0.2038	23.39E-3	3.32E10
20	0.060	1.3004E4	791.0	1.7040E-1	1183C3	2.484C3	0.581E-3	9.561E-6	0.2008	0.2008	22.64E-3	3.65E10
30	0.050	2.1869E4	781.7	2.7850E-1	1169C3	2.541C3	0.509E-3	9.901E-6	0.1979	0.1979	21.87E-3	4.23E10
40	0.040	3.5446E4	772.2	4.4018E-1	1153C3	2.605C3	0.441E-3	10.241E-6	0.1951	0.1951	21.07E-3	4.51E10
50	0.030	5.5571E4	762.6	6.7465E-1	1135C3	2.676C3	0.380E-3	10.583E-6	0.1923	0.1923	20.23E-3	4.74E10
60	0.020	8.4540E4	752.0	1.0061	1117C3	2.7581C3	0.343E-3	10.926E-6	0.1896	0.1896	19.37E-3	4.94E10
70	0.010	1.2515E5	742.7	1.4640	1096C3	2.849C3	0.309E-3	11.271E-6	0.1870	0.1870	18.40E-3	5.09E10
80	0.010	1.8075E5	732.4	2.0036	1073C3	2.940C3	0.271E-3	11.619E-6	0.1845	0.1845	17.56E-3	5.20E10
90	0.010	2.5522E5	721.8	2.9071	1051C3	3.047C3	0.242E-3	11.970E-6	0.1821	0.1821	16.61E-3	5.26E10
100	0.020	3.5306E5	710.0	3.9840	1026C3	3.166C3	0.217E-3	12.327E-6	0.1798	0.1798	15.63E-3	5.26E10
110	0.030	4.7934E5	699.3	5.3727	999.2C3	3.295C3	0.194E-3	12.690E-6	0.1775	0.1775	14.62E-3	5.27E10
120	0.030	6.3972E5	687.3	7.1420	970.2C3	3.437C3	0.173E-3	13.061E-6	0.1754	0.1754	13.59E-3	5.23E10
130	0.030	8.4046E5	674.6	9.3734	939.0C3	3.5921C3	0.153E-3	13.442E-6	0.1734	0.1734	12.54E-3	5.12E10
140	0.040	1.0984E6	661.1	1.2164E1	905.4C3	3.750C3	0.130E-3	13.833E-6	0.1715	0.1715	11.46E-3	4.95E10
150	0.040	1.3913E6	646.6	1.5634E1	869.1C3	3.915C3	0.123E-3	14.246E-6	0.1696	0.1696	10.35E-3	4.72E10
160	0.050	1.7364E6	631.0	1.9931E1	829.1C3	4.117C3	0.109E-3	14.678E-6	0.1679	0.1679	9.229E-3	4.42E10
170	0.050	2.1932E6	613.9	2.5240E1	787.1C3	4.3296C3	0.097E-3	15.127E-6	0.1663	0.1663	8.007E-3	4.04E10
180	0.040	2.7107E6	595.0	3.1040E1	740.3C3	4.5455C3	0.085E-3	15.610E-6	0.1640	0.1640	6.923E-3	3.60E10
239.49	0.100	8.0700E6	277.0	7.7200E2	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ๓.3 Thermophysical Properties on the Saturation Line of Acetone

ACETONE												
Thermophysical Properties on the Saturation Line												
<i>t</i>	Uncertainty $\left(\frac{dt}{dp}\right) \delta p$	<i>p</i>	ρ_l	ρ_v	<i>h_{fg}</i>	<i>c_{pl}</i>	μ_l	μ_v	λ_l	σ	α_l	α_v
°C	°C	Pa	kg/m ³	kg/m ³	J/kg	J/(kg K)	N s/m ²	N s/m ²	W/(m K)	N/m	W/m ²	kg/(m ^{3/4} s ^{1/4})
-55	4.500	2.2293	915.2	0.5951E-5	635.7E3	1.997E3	2.255E-3	4.061E-6	0.2101	39.02E-3	1.01E10	1217
-50	4.000	4.4704	909.7	1.6935E-4	632.0E3	1.994E3	1.951E-3	4.970E-6	0.2079	38.14E-3	1.13E10	1246
-40	3.000	1.5870E1	870.0	5.7806E-4	624.5E3	2.001E3	1.501E-3	5.197E-6	0.2034	36.56E-3	1.30E10	1297
-30	2.000	4.8047E1	827.9	1.7027E-3	616.9E3	2.009E3	1.109E-3	5.434E-6	0.1990	35.60E-3	1.64E10	1340
-20	1.000	1.3500E2	777.1	4.4317E-3	609.1E3	2.019E3	0.965E-3	5.677E-6	0.1945	34.75E-3	1.90E10	1375
-10	0.500	3.2629E2	866.4	1.0307E-2	601.2E3	2.029E3	0.900E-3	5.925E-6	0.1902	32.90E-3	2.14E10	1403
0	0.100	7.3178E2	855.6	2.2267E-2	593.1E3	2.042E3	0.675E-3	6.179E-6	0.1850	31.56E-3	2.37E10	1425
10	0.070	1.5110E3	844.9	4.4213E-2	584.9E3	2.056E3	0.570E-3	6.436E-6	0.1815	30.23E-3	2.59E10	1441
20	0.040	2.9460E3	834.2	0.2170E-1	576.4E3	2.072E3	0.502E-3	6.697E-6	0.1773	28.91E-3	2.77E10	1452
30	0.030	5.1072E3	823.4	1.4420E-1	567.0E3	2.090E3	0.442E-3	6.961E-6	0.1731	27.59E-3	2.92E10	1459
40	0.060	9.3564E3	812.6	7.4069E-1	559.0E3	2.111E3	0.392E-3	7.220E-6	0.1689	26.28E-3	3.09E10	1463
50	0.050	1.5524E4	801.8	3.8454E-1	550.0E3	2.134E3	0.351E-3	7.490E-6	0.1648	24.99E-3	3.16E10	1457
60	0.050	2.4740E4	790.9	5.9112E-1	540.7E3	2.159E3	0.317E-3	7.772E-6	0.1607	23.70E-3	3.20E10	1451
70	0.050	3.8039E4	779.0	0.7032E-1	531.1E3	2.187E3	0.280E-3	8.050E-6	0.1567	22.42E-3	3.22E10	1441
80	0.050	5.6651E4	768.7	1.2664E-1	521.3E3	2.219E3	0.243E-3	8.331E-6	0.1527	21.15E-3	3.22E10	1429
90	0.050	8.1999E4	757.4	2.7779E-1	511.2E3	2.254E3	0.212E-3	8.617E-6	0.1488	19.90E-3	3.10E10	1413
100	0.050	1.1370E5	745.9	2.4377E-1	500.0E3	2.293E3	0.224E-3	8.900E-6	0.1449	18.65E-3	3.11E10	1395
110	0.050	1.5994E5	734.2	3.2726E-1	490.0E3	2.336E3	0.200E-3	9.202E-6	0.1412	17.42E-3	3.02E10	1378
120	0.100	2.1549E5	722.3	4.3123E-1	478.0E3	2.384E3	0.194E-3	9.510E-6	0.1374	16.19E-3	2.89E10	1353
130	0.150	2.8570E5	710.0	5.5006E-1	467.2E3	2.436E3	0.181E-3	9.822E-6	0.1330	15.00E-3	2.75E10	1329
140	0.200	3.7243E5	697.3	7.1372E-1	455.1E3	2.495E3	0.170E-3	1.0144E-5	0.1302	13.79E-3	2.59E10	1303
150	0.250	4.7815E5	684.2	0.9901E-1	442.3E3	2.560E3	0.159E-3	1.0473E-5	0.1267	12.61E-3	2.40E10	1275
160	0.300	6.0462E5	670.6	1.1217E-1	429.2E3	2.631E3	0.150E-3	1.0823E-5	0.1232	11.46E-3	2.20E10	1246
170	0.350	7.5699E5	656.4	1.3049E-1	415.2E3	2.710E3	0.141E-3	1.1189E-5	0.1199	10.29E-3	1.90E10	1215
180	0.400	9.3578E5	641.4	1.6761E-1	400.4E3	2.797E3	0.134E-3	1.1565E-5	0.1167	9.160E-3	1.76E10	1183
190	0.450	1.1447E6	625.6	2.0639E-1	384.6E3	2.891E3	0.126E-3	1.1970E-5	0.1135	8.047E-3	1.53E10	1149
200	0.500	1.3873E6	608.6	2.4699E-1	367.2E3	2.992E3	0.119E-3	1.2400E-5	0.1103	6.956E-3	1.30E10	1114
210	0.450	1.6660E6	590.2	3.0199E-1	349.2E3	3.107E3	0.113E-3	1.2874E-5	0.1075	5.809E-3	1.00E10	1076
220	0.400	1.9072E6	570.1	3.6402E-1	329.0E3	3.190E3	0.106E-3	1.3394E-5	0.1047	4.644E-3	0.65E10	1036
234.95	0.100	4.7050E6	270.0	2.7000E2	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ค.4 Thermophysical Properties on the Saturation Line of Water

t	Uncertainty $\left(\frac{dt}{dp}\right) \delta p$	(p)	(ρ_l)	(ρ_v)	L	c_{sl}	(μ_l)	μ_u	λ_l	ϕ	ϕ_1	ϕ_2	t
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	Pa	kg/m^3	kg/m^3	J/kg	J/(kg K)	N s/m^2	N s/m^2	W/(m K)	N/m	W/m^2	$\text{kg/(K}^{1/4}\text{s}^{1/2})$	$^{\circ}\text{C}$
0.01	0.010	6.1160E2	1003.1	4.8318E-3	2498E3	4.186E3	1.761E-3	9.172E-6	0.5611	75.66E-3	10.79E10	1970	0.01
10	0.009	1.2284E3	1007.2	9.4539E-3	2476E3	4.184E3	1.513E-3	9.457E-6	0.5975	74.23E-3	14.04E10	4394	10
20	0.008	2.3397E3	998.6	1.7364E-2	2434E3	4.182E3	1.013E-3	9.751E-6	0.5997	72.75E-3	17.59E10	4777	20
30	0.007	4.2371E3	994.7	3.0498E-2	2431E3	4.182E3	8.06E-4	10.051E-6	0.6157	71.21E-3	21.37E10	5130	30
40	0.006	7.3834E3	990.4	5.1341E-2	2407E3	4.183E3	6.57E-4	10.358E-6	0.6298	69.61E-3	25.26E10	5474	40
50	0.005	1.2547E4	985.8	8.3217E-2	2384E3	4.183E3	5.48E-4	10.648E-6	0.6430	67.96E-3	29.15E10	5783	50
60	0.004	1.9924E4	980.8	1.3038E-1	2362E3	4.183E3	4.45E-4	10.931E-6	0.6575	66.25E-3	32.94E10	6086	60
70	0.003	3.1176E4	975.4	1.9816E-1	2335E3	4.193E3	3.52E-4	11.212E-6	0.6683	64.50E-3	36.55E10	6373	70
80	0.002	4.7727E4	969.7	2.9303E-1	2310E3	4.202E3	2.82E-4	11.494E-6	0.6784	62.69E-3	39.88E10	6653	80
90	0.001	7.0113E4	963.5	4.2272E-1	2284E3	4.211E3	2.31E-4	11.764E-6	0.6789	60.83E-3	42.89E10	6935	90
100	0.001	1.0132E5	957.0	5.9632E-1	2257E3	4.222E3	1.80E-4	12.027E-6	0.6801	58.93E-3	45.52E10	7219	100
110	0.010	1.4325E5	950.0	8.2431E-1	2230E3	4.235E3	1.42E-4	12.277E-6	0.6811	56.98E-3	47.71E10	7509	110
120	0.020	1.9852E5	942.6	1.1187	2202E3	4.251E3	1.12E-4	12.527E-6	0.6821	54.99E-3	49.46E10	7719	120
130	0.071	2.7010E5	934.8	1.4950	2174E3	4.269E3	9.22E-5	12.777E-6	0.6830	52.95E-3	50.74E10	7925	130
140	0.022	3.6133E5	926.6	1.9624	2144E3	4.291E3	7.19E-5	13.027E-6	0.6840	50.88E-3	51.55E10	8140	140
150	0.023	4.7594E5	917.9	2.5440	2113E3	4.316E3	5.60E-5	13.270E-6	0.6856	48.78E-3	51.89E10	8364	150
160	0.024	6.1999E5	908.7	3.2284	2081E3	4.344E3	4.30E-5	13.510E-6	0.6872	46.63E-3	51.76E10	8599	160
170	0.025	7.9192E5	899.0	4.1207	2048E3	4.377E3	3.25E-5	13.751E-6	0.6781	44.43E-3	51.18E10	8834	170
180	0.026	1.0023E6	888.7	5.1601	2013E3	4.414E3	2.41E-5	14.000E-6	0.6741	42.21E-3	50.17E10	9069	180
190	0.028	1.2548E6	876.0	6.4004	1977E3	4.457E3	1.82E-5	14.250E-6	0.6690	39.97E-3	48.77E10	9304	190
200	0.030	1.5543E6	864.7	7.8708	1939E3	4.505E3	1.35E-5	14.500E-6	0.6631	37.70E-3	46.99E10	9539	200
210	0.031	1.9068E6	854.1	9.6039	1900E3	4.560E3	1.02E-5	14.750E-6	0.6562	35.41E-3	44.86E10	9774	210
220	0.032	2.3183E6	842.2	1.1637E1	1858E3	4.622E3	7.72E-6	15.000E-6	0.6484	33.09E-3	42.43E10	10009	220
230	0.033	2.7933E6	829.0	1.4013E1	1814E3	4.693E3	5.81E-6	15.250E-6	0.6398	30.78E-3	39.73E10	10244	230
240	0.034	3.3443E6	815.0	1.6783E1	1767E3	4.774E3	4.31E-6	15.500E-6	0.6299	28.42E-3	36.79E10	10479	240
250	0.035	3.9726E6	800.2	2.0005E1	1717E3	4.867E3	3.10E-6	15.750E-6	0.6192	26.07E-3	33.66E10	10714	250
260	0.036	4.6876E6	784.7	2.3753E1	1663E3	4.974E3	2.10E-6	16.000E-6	0.6075	23.72E-3	30.39E10	10949	260
270	0.037	5.4972E6	768.2	2.8113E1	1606E3	5.097E3	1.40E-6	16.250E-6	0.5947	21.37E-3	27.01E10	11184	270
280	0.038	6.4098E6	750.4	3.3199E1	1544E3	5.240E3	9.03E-7	16.500E-6	0.5807	19.02E-3	23.58E10	11419	280
290	0.039	7.4341E6	731.8	3.9156E1	1476E3	5.407E3	5.40E-7	16.750E-6	0.5656	16.70E-3	20.14E10	11654	290
300	0.040	8.5798E6	711.6	4.6176E1	1401E3	5.603E3	3.08E-7	17.000E-6	0.5492	14.35E-3	16.74E10	11889	300
310	0.041	9.8572E6	689.8	5.4500E1	1318E3	5.835E3	1.68E-7	17.250E-6	0.5314	12.12E-3	13.46E10	12124	310
320	0.042	1.1278E7	665.9	6.4408E1	1225E3	6.114E3	9.07E-8	17.500E-6	0.5122	9.89E-3	10.33E10	12359	320
330	0.043	1.2853E7	639.5	7.7016E1	1119E3	6.431E3	5.07E-8	17.750E-6	0.4915	7.73E-3	7.45E10	12594	330
340	0.044	1.4598E7	609.0	9.2773E1	993.4E3	6.858E3	3.07E-8	18.000E-6	0.4691	5.45E-3	4.87E10	12829	340

ตารางที่ ค.5 ค่าคงที่ในตัวกลางของแข็งที่อุณหภูมิ 20°C

medium	Density x 10 ³ [kg/m ³]	Poisson's number μ	Propagation c [m/s]		Wave resistance $Z_e = \rho C_L 10^6$ [Pa.s/m]
			longitudinal	transverse	
metal					
tin	7.30	0.33	3320	1670	24.2
aluminium	2.70	0.34	6320	3080	17.0
magnesium	1.73	0.30	5780	3050	10.0
cast iron	7.20	-	3500-5600	2200-3200	25-40
brass	8.10	0.35	3830	2123	31.0
nickel	8.80	0.31	3830	2960	49.5
steel	7.80	0.28	5900-6000	3200	46.3
Non-metals					
ice	1	0.33	3980	1990	3.98
organic glass	1.18	0.35	2670	1121	3.2
polystyrene	1.06	0.32	2350	1120	2.40
porcelain	2.40	-	5300-5500	-	13
quartz glass	2.60	0.17	5570	3515	14.5
teflon	2.20	-	1350	-	3
rock					
Basalt	2.72	0.3	5930	3140	16.2
Sate	2.74	0.27	6300	3610	17.8
marble	2.66	0.30	6150	3260	16.4
granite	2.62	0.18	4450	2780	11.6

ที่มา ; Stefan and Zdenko. (1996).

ตารางที่ ค.6 ค่าคงที่ในตัวกลางของเหลวที่อุณหภูมิ 20°C

liquid	Density . 10 ³ [kg/m ³]	Propagation velocity c [m/s]	Absolute temperature Coefficient γ [m/sK]	Wave resistance $Z_e =$ $\rho C_L 10^6$ [Pa.s/m]
acetone	0.792	1192	-5.5	94
ethanol	0.789	1180	-3.6	93
petrol	-	1162	-4.14	-
glycerol	1.261	1923	-1.8	242
choroform	1.489	1005	-	149
methanol	0.792	1128	-3.3	89
olive oil	0.905	1405	-	127
paraffin oil	0.835	1444	-	121
linseed oil	0.922	1923	-	165
toluene	0.866	1328	-	65
tetrachloromethane	1.595	938	-3	150
water	0.997	1483	+2.5	148
transformer oil	0.9	1400	-	130

ที่มา ; Stefan and Zdenko. (1996).



ภาคผนวก ง.
ผลงานวิชาการที่ได้เผยแพร่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลของมุมเอียงต่อสมรรถนะของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ทำงาน ภายใต้คลื่นอัลตราโซนิก

Effect of Inclination Angle on Performance of Thermosyphon Heat Pipe Operating Under Ultrasonic Wave

ธรรมบุญ เตชะนา

ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

วิภาวดี วงษ์สุวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

อดิพงศ์ นันทพันธุ์

กองศูนย์อบรมแม่เมาะ

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง 52220

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของการเดือดภายในท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน กรณีใช้ร่วมกับระบบอัลตราโซนิก ในกรณีของท่อที่วางในแนวตั้งและแนวเอียงโดยการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน กับอุณหภูมิของน้ำเข้าส่วนทำระเหยและมุมของท่อความร้อนที่กระทำต่อแนวระนาบ ในการทดสอบใช้น้ำร้อนแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำเย็น วัสดุที่ใช้ท่อเป็นทองแดง ไม่มีครีป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 27.75 mm หนา 1.3 mm ยาว 1.2 m ส่วนทำระเหยยาว 0.5 m ส่วนอะเดียแบติกยาว 0.2 m อุณหภูมิน้ำร้อนอยู่ในช่วง 50°C-80°C ใช้น้ำเป็นสารทำงาน มีอัตราการเติมสารทำงาน 50 % ของส่วนทำระเหย หัวกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกติดตั้งบริเวณด้านล่างของท่อบริเวณส่วนทำระเหยโดยกำเนิดคลื่น 8 kHz 10 kHz และ 14 kHz

จากผลการทดสอบ พบว่าคลื่นอัลตราโซนิกสามารถช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนส่วนระเหยได้สูงสุดประมาณ 370% ที่อุณหภูมิขาเข้าของน้ำร้อน 50°C-60°C แต่ที่อุณหภูมิของน้ำร้อนเพิ่มขึ้น พบว่าสมรรถนะของท่อความร้อนที่ใช้และไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิก มีค่าใกล้เคียงกัน ในกรณีของท่อที่วางตัวตามแนวเอียง พบว่าที่มุมเอียง 30 องศา กับแนวระนาบ มีสมรรถนะสูงที่สุด

คำสำคัญ: การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, คลื่นอัลตราโซนิก, มุมที่ท่อความร้อนทำกับแนวระนาบ

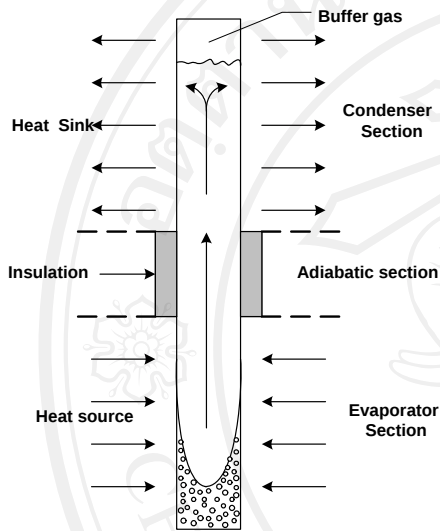
ท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

ส่วนระเหย (Evaporator Section) ส่วนอะเดียแบติก (Adiabatic Section) และส่วนควบแน่น (Condenser Section) ดังรูปที่ 1 ส่วนระเหยรับความร้อนจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้ของไหลทำงาน (Working Fluid) ที่มีอยู่ภายในท่อเกิดการเดือดเปลี่ยนสถานะเป็นไอ และไอของของไหลทำงานจะไหลไปยังส่วนควบแน่นทางด้านบน แล้วควบแน่นเป็นของเหลว ไหลลงตามแรงโน้มถ่วงเพื่อย้อนกลับไปยังพลังงานใหม่ เป็นวงจรแบบนี้ต่อไปเรื่อยๆ

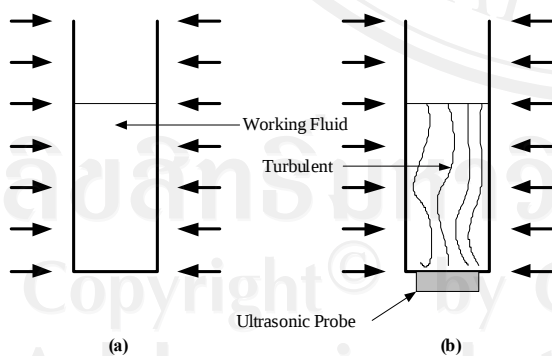
บทนำ

ท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่ง ที่ถูกใช้มากในกระบวนการอุตสาหกรรมเนื่องจากมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง รวมทั้งมีรูปแบบโครงสร้างที่ง่ายต่อการผลิต ปัจจุบันนิยมใช้ในการดึงความร้อนจากกระบวนการทิ้งความร้อนกลับมาใช้ใหม่ (Waste Heat Recovery)

โดยทั่วไปแล้ว การถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอน จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแหล่งให้และแหล่งรับความร้อน สำหรับกรณีอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนที่ต่ำ พบว่ากระบวนการถ่ายเทความร้อนในท่อไม่ดี เนื่องจากสารทำงานในท่อเกิดการเดือดยาก หนทางหนึ่งในการแก้ปัญหา คือ การเลือกใช้เทคนิคการสั่นของของไหลทำงานโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก เพื่อกระตุ้นให้สารทำงานในท่อให้เกิดการปั่นป่วนขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนภายในส่วนระเหยดีขึ้น



รูปที่ 1 หลักการทำงานอย่างง่ายของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน



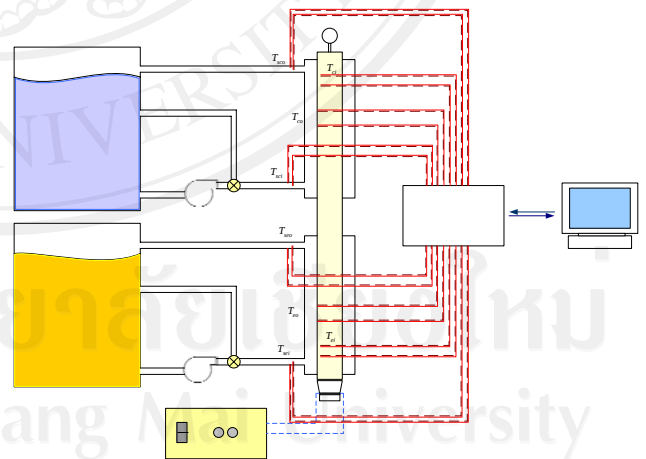
รูปที่ 2 ผลของคลื่นอัลตราโซนิกต่อสารทำงานในท่อ
(a) ไม่มีคลื่นอัลตราโซนิก (b) มีคลื่นอัลตราโซนิก

จากการศึกษาของ Oh et al. [1] พบว่าการสั่นของคลื่นอัลตราโซนิกมีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสาร พบว่าคลื่นอัลตราโซนิก

ทำให้กระบวนการหลอมละลายของสารเร็วขึ้น 2.5 เท่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มี การติดระบบอัลตราโซนิก

ศิริศักดิ์ ศรีวิชัย [2] ได้ศึกษาวิธีการเพิ่มสมรรถนะของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก โดยท่อความร้อนดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.029 เมตร ความยาวของส่วนระเหยและส่วนควบแน่น ส่วนละ 0.16 เมตร ความยาวของส่วนอะเดียแบติก 0.52 เมตร แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนอุณหภูมิ 35 - 65 องศาเซลเซียสกับน้ำเย็นอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส และ ติดตั้งเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก บริเวณปลายท่อของส่วนระเหย ในงานวิจัยนี้ความถี่ของคลื่นที่ป้อนเข้าสู่ท่อความร้อนมีค่าระหว่าง 8-14 กิโลเฮิรซ์ พบว่า สมรรถนะของท่อความร้อนเพิ่มขึ้น 20-60% ขึ้นอยู่กับสารทำงาน และอุณหภูมิของน้ำร้อน และความถี่ที่เหมาะสมคือ 8 กิโลเฮิรซ์

อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่ได้มีการศึกษาสมรรถนะของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ที่มีการเพิ่มสมรรถนะโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งวางตัวอยู่ในแนวเอียงทำมุมต่างๆ จากแนวระดับ ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาสมรรถนะของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ภายใต้สภาวะการทำงานดังกล่าว ทั้งนี้ผลงานวิจัยที่ได้รับสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับ กรณีของระบบผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อความร้อนได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3 แสดงชุดทดสอบเพื่อการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนขณะมีระบบอัลตราโซนิกประกอบ

วัสดุและวิธีการวิจัย

1. การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ

รูปที่ 3 แสดงชุดทดสอบเพื่อการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซโฟน ขณะมีระบบอุณหภูมิตัวประกอบ โดยท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซโฟนผลิตจากท่อทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 27.75 mm หนา 1.3 mm ยาว 1.2 m ส่วนทำระเหยยาว 0.5 m ส่วนอะเดียแบติกยาว 0.2 m ใช้น้ำเป็นสารทำงานโดยเติมที่ 50 % ของปริมาตรส่วนทำระเหย วัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K 16 จุด ประกอบด้วย อุณหภูมิมีน้ำเข้าและออกส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น อุณหภูมิผนังท่อความร้อนด้านนอกส่วนทำระเหยและควบแน่น และอุณหภูมิภายในท่อความร้อนส่วนทำระเหยและควบแน่น ตำแหน่งละ 2 จุด วัดอัตราการไหลของน้ำเข้าส่วนควบแน่นโดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหล แบบ Rotameter วัดได้ในช่วง 0.013-0.568 l/min มีค่าความผิดพลาด 0.01 l/min ชุดระบบทำความร้อน ประกอบด้วยอ่างสแตนเลส ขนาด 50 x 50 x 45 cm มีฮีทเตอร์ขนาด 1 kW จำนวน 6 ชุด และ ชุดอุปกรณ์กำเนิดคลื่นอุลตราโซนิก ใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 140 W กำเนิดคลื่นความถี่สูงสุด 40 kHz

2. การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

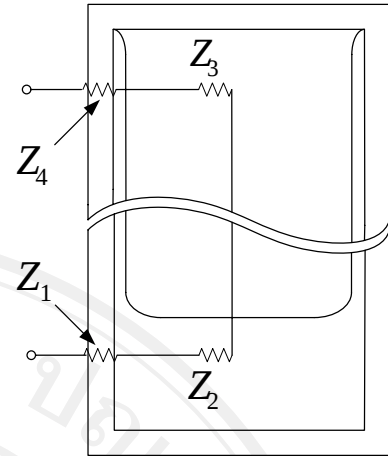
อัตราการถ่ายเทความร้อน ของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซโฟน สามารถคำนวณได้จากการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นดังต่อไปนี้

$$Q_c = \dot{m}C_p(T_{sc,out} - T_{sc,in}) \quad (1)$$

ในกรณีที่ไม่มี การสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่น จะมีเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนระเหย ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_c = Q_e \quad (2)$$



รูปที่ 4 วงจรต้านทานทางความร้อน

จากวงจรการถ่ายเทความร้อนดังรูปที่ 4 อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนระเหย มีค่าเท่ากับ

$$Q_e = \frac{T_{eo} - T_{ei}}{Z_1 + Z_2} \quad (3)$$

โดยที่

$$Z_1 = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi K_{copper} L_e} \quad (4)$$

ดังนั้น สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ส่วนระเหยได้จาก

$$Z_2 = \frac{T_{eo} - T_{ei}}{Q_e} - Z_1 \quad (5)$$

$$h_{ei} = \frac{1}{Z_2 A_{ei}} \quad (6)$$

อนึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของส่วนระเหย ยังสามารถคำนวณได้จากสมการของ ESDU No. 81038 [3] ดังต่อไปนี้

$$Z_2 = Z_{2p} \quad \text{if } Z_{2p} < Z_{2f} \quad (7)$$

$$Z_2 = Z_{2p} F + Z_{2f} (1 - F)$$

$$Z_{2f} = \frac{CQ^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} L_e \Phi_2^{4/3}}; C = 0.235 \quad (8)$$

$$Z_{2p} = \frac{1}{\Phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} (\pi D L_e)^{0.6}} \quad (9)$$

โดยที่

$$\Phi_3 = 0.32 \frac{\rho_l^{0.65} \lambda_l^{0.3} C p_l^{0.7}}{\rho_v^{0.25} L^{0.4} \mu_l^{0.1}} \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23}$$

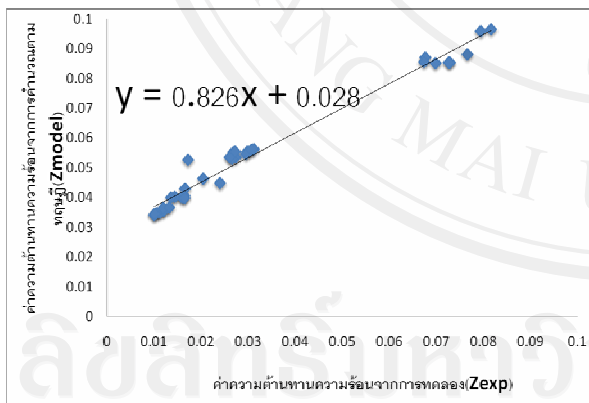
$$\Phi_3 = 63 \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23}; \text{water}$$
(10)

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

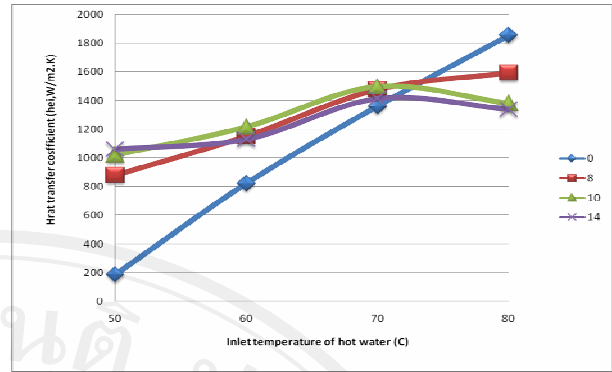
ในกรณีของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่อยู่ในแนวดิ่งและไม่มีคลีนอลตราโซนิก ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของการเดือดที่ส่วนระเหย ที่ได้จากการทดลอง และจากการคำนวณตามสมการ 7-10 แสดงดังรูปที่ 5 พบว่ามีความแตกต่างกันในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$Z_{2,model} = 0.826Z_{2,exp} + 0.028$$
(11)

ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเนื่องมาจาก สภาวะในการทดสอบนั้น การเดือดของน้ำในท่อเป็นไปได้ยาก การใช้สมการ 7-10 ซึ่งพัฒนามาจากปรากฏการณ์ของการเดือดแบบแอ่ง (Pool Boiling) และการเดือดแบบฟิล์ม (Film Boiling) คำนวณค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนนั้น ย่อมมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อเทอร์โมไซฟอน (Z_2) ระหว่างการทดลองกับค่าคำนวณตามทฤษฎี

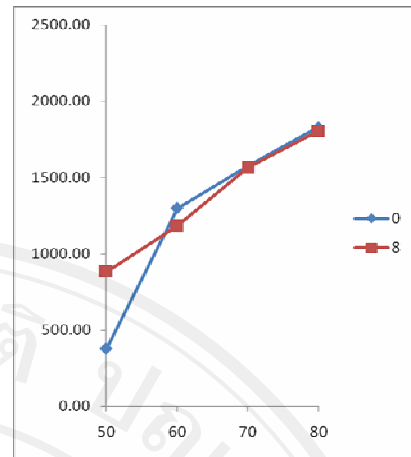


รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อความร้อน (h_{ei}) กับอุณหภูมิของน้ำที่เข้าส่วนทำระเหย กรณีมีคลีนอลตราโซนิกที่ความถี่ 0, 8, 10 และ 14 กิโลเฮิรซ์ ตามลำดับ

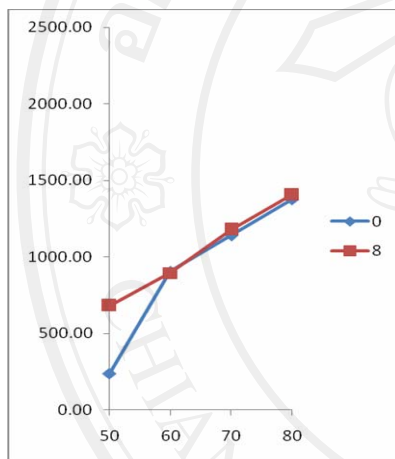
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อความร้อน (h_{ei}) กับอุณหภูมิของน้ำที่เข้าส่วนทำระเหย กรณีมีคลีนอลตราโซนิกที่ความถี่ 0, 8, 10 และ 14 กิโลเฮิรซ์ ในกรณีของท่อที่วางตัวในแนวดิ่ง ซึ่งใช้น้ำเป็นสารทำงาน พบว่า อุณหภูมิของน้ำเข้าส่วนทำระเหยที่ 50 องศาเซลเซียส คลีนอลตราโซนิกที่ 8 กิโลเฮิรซ์ มีผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อถึง 370% และพบว่า ระดับของคลื่นความถี่แต่ละค่า ให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน ในกรณีที่อุณหภูมิของน้ำร้อนเพิ่มสูงขึ้นพบว่า ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างกรณีที่มิคลีนอลตราโซนิกและไม่มีคลีนอลตราโซนิกมีค่าลดลง และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของทุกกรณีมีค่าประมาณเท่ากันที่อุณหภูมิของน้ำร้อนประมาณ 70 °C อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิของน้ำร้อนสูงกว่า 70 °C พบว่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในกรณีที่ไม่มีคลีนอลตราโซนิกมีค่าสูงที่สุด ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ในกรณีที่อุณหภูมิน้ำร้อนต่ำ สารทำงานภายในท่อความร้อนเกิดการเดือดได้ยาก การใช้คลีนอลตราโซนิกช่วยกระตุ้นให้เกิดการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น แต่ในกรณีที่อุณหภูมิน้ำร้อนเพิ่มมากขึ้น สารทำงานภายในท่อความร้อนสามารถเดือดได้เอง การใช้คลีนอลตราโซนิกเข้าไปกระตุ้นอาจส่งผลให้เกิดการแห้ง (Dry-out) ขึ้นบนพื้นผิวรับความร้อนภายในท่อ ซึ่งส่งผลให้สมรรถนะของท่อความร้อนในกรณีนี้ลดต่ำลง ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เป็นเช่นเดียวกับการทดลองของศิริศักดิ์ ศรีวิชัย [2]

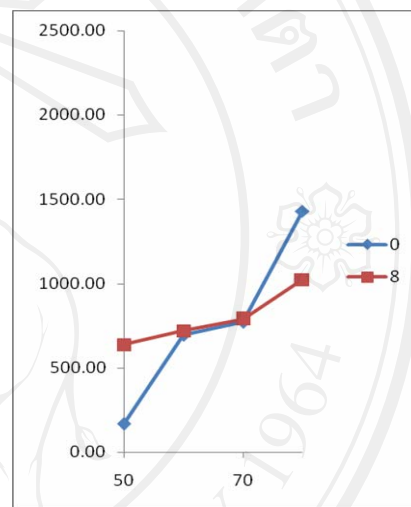
ในกรณีของท่อที่วางตัวในแนวเอียง ดังรูปที่ 7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อความร้อน (hei) กับอุณหภูมิของน้ำที่เข้าส่วนทำระเหย กรณีมีคลื่นอัลตราโซนิกที่ความถี่ 8 kHz และกรณีไม่มีคลื่นอัลตราโซนิก ที่มุมเอียง 18, 30, 45, 60, 75 และมุม 90 องศา กับแนวระนาบ พบว่า ที่มุมใดๆ คลื่นอัลตราโซนิกสามารถช่วยเพิ่มให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสารทำงาน เพิ่มขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิที่สารทำงานไม่สามารถเดือดได้เองตามธรรมชาติ เช่นเดียวกับกรณีของท่อที่วางตัวในแนวดิ่ง และที่มุม 30 องศา กับแนวระนาบ มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงที่สุด คือ $2270 \text{ W/m}^2\text{K}$



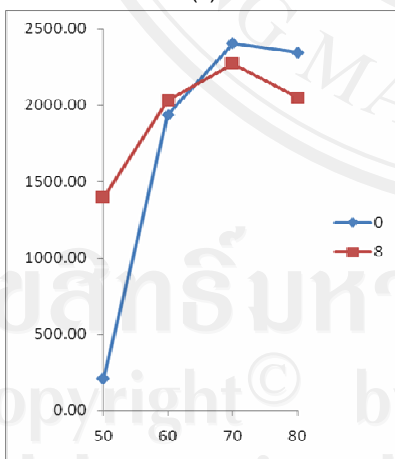
(c)



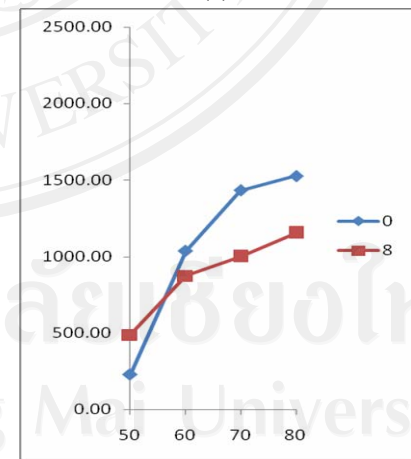
(a)



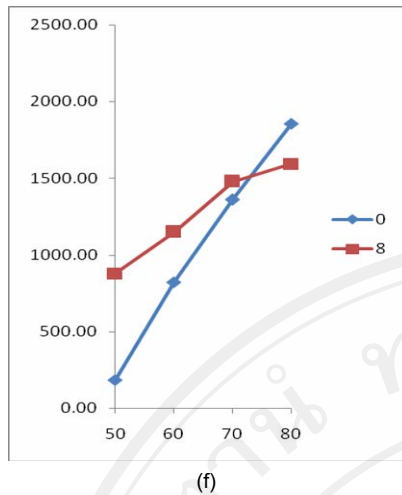
(d)



(b)



(e)



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อความร้อน (hei) กับอุณหภูมิของน้ำที่เข้าส่วนทำระเหย กรณีมีคลื่นอัลตราโซนิกที่ความถี่ 0 และ 8 kHz ที่มุมเอียง (a) 18 (b) 30 (c) 45 (d) 60 (e) 75 (f) 90 องศา กับแนวระนาบ

สรุปผลการทดสอบ

ผลที่ได้จากการคำนวณสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมโซโฟน พบว่าคลื่นอัลตราโซนิก สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในประมาณ 8.6% – 370% ที่อุณหภูมิของสารทำงานไม่สามารถเดือดได้ด้วยตนเอง แต่เมื่อสารทำงานเริ่มเดือด ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีคลื่นอัลตราโซนิก เนื่องจากเกิดการแห้ง (Dry-out) ขึ้นบนพื้นผิวรับความร้อนภายในท่อ ที่มุมเอียงใดๆ คลื่นอัลตราโซนิกสามารถช่วยเพิ่มให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสารทำงานได้ ในช่วงอุณหภูมิที่สารทำงานไม่สามารถเดือดได้เองตามธรรมชาติ และที่มุม 30 องศา กับแนวระนาบ มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงที่สุด คือ คือ 2370 W/m²K

เอกสารอ้างอิง

- [1] Oh, Y.K., Park, S.H. and Cho, Y.I. (2002), A Study of the Effect of Ultrasonic Vibrations on Phase-Change Heat Transfer, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 45, pp. 4631-4641.
- [2] ศิริศักดิ์ ศรีวิชัย. (2550). การเสริมความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเทอร์โมโซโฟนโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร

มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

- [3] Engineering Data Science Unit No. 81038, Heat Pipes- Performance Enhancement of Two-Phase Closed Thermosyphon, ESDU Int. Plc., London, UK, 1983.

รายการสัญลักษณ์

A	พื้นที่ผิวท่อ
C_p	ความจุความร้อน
D	เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ
f	ความถี่คลื่น
g	ความโน้มถ่วงของโลก
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
k	การนำความร้อนของท่อ
λ_f	การนำความร้อนของของเหลว
L_c	ความยาวส่วนควบแน่น
L_e	ความยาวส่วนทำระเหย
LMTD	อุณหภูมิแตกต่างเชิงล็อก
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล
P	ความดัน
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน
T	อุณหภูมิ
U	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม
σ	แรงตึงผิวของของเหลว
ρ	ความหนาแน่น
μ	ความหนืดของของเหลว

ตัวกำกับล่าง

a	ส่วนอะเดียแบติก
atm	สภาวะบรรยากาศ
c	ส่วนควบแน่น
e	ส่วนทำระเหย
i	ภายในท่อ
l	ของเหลว
no, ul	ไม่มีระบบคลื่นอัลตราโซนิก
o	ผนังภายนอกท่อ
s	สิ่งแวดล้อม
v	ไอ
ul	มีระบบคลื่นอัลตราโซนิก

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ

นายธรรมนุญ เตชะนา

Mr.Thummanoon Theachana

วัน เดือน ปี เกิด

10 ธันวาคม 2525

ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเวียงเจดีย์วิทยา

จ.ลำพูน ปีการศึกษา 2543

สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จ.นครราชสีมา ปีการศึกษา 2547

ที่อยู่

549/17 หมู่ 14 ต.เลี้ยว อ.เลี้ยว จ.ลำพูน 51110

Email address:

nova_club@hotmail.com

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved