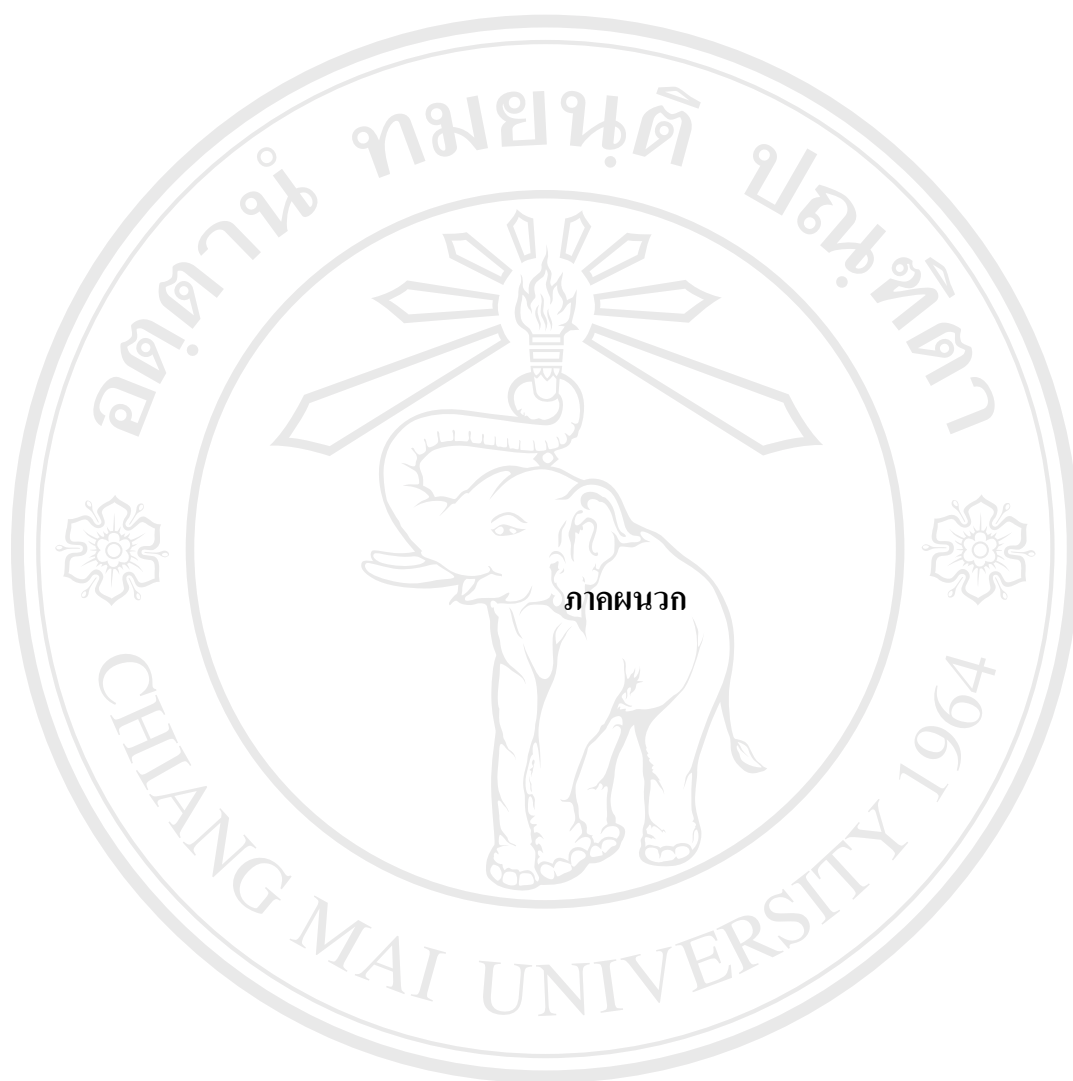




ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright © by Chiang Mai University

All rights reserved



ภาคผนวก ก

ข้อมูลจากการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลข

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright © by Chiang Mai University

All rights reserved

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการวัดอุณหภูมิในการควบคุมอุณหภูมิเผาอิฐ 10 ครั้ง ทุก 10 นาที

เวลา (นาที)	ตำแหน่งบริเวณกลางห้องเผาด้านบน									เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	
0	110.87	129.87	61.86	235.87	112.27	199.40	274.88	231.44	181.86	170.92
10	113.53	131.45	65.18	237.45	114.93	203.80	291.51	231.37	185.18	174.93
20	115.82	134.13	69.40	240.13	117.22	206.54	300.74	231.19	189.40	178.29
30	119.65	136.59	73.74	242.59	121.05	208.84	296.91	230.71	193.74	180.43
40	124.64	139.14	77.95	245.14	126.04	210.45	306.32	229.75	197.95	184.15
50	129.41	140.88	80.45	246.88	130.81	211.60	324.48	228.96	200.45	188.21
60	132.39	142.46	82.60	248.46	133.79	212.42	387.25	227.91	202.60	196.65
70	136.60	143.71	86.46	249.71	138.00	212.72	408.97	226.98	206.46	201.07
80	141.04	144.36	89.86	250.36	142.44	211.84	401.85	225.94	209.86	201.95
90	146.06	144.81	92.47	250.81	147.46	210.92	383.40	224.33	212.47	201.41
100	149.85	145.10	95.24	251.10	151.25	209.65	368.00	222.78	215.24	200.91
110	152.27	144.90	99.06	250.90	153.67	208.83	359.16	221.37	219.06	201.02
120	157.29	144.71	102.31	250.71	158.69	211.99	353.12	220.00	222.31	202.35
130	162.78	142.49	104.27	248.49	164.18	209.14	347.88	218.67	224.27	202.46
140	168.79	146.35	107.18	252.35	170.19	200.03	343.98	217.28	227.18	203.70
150	169.02	145.58	109.93	251.58	170.42	203.04	340.98	215.84	229.93	204.03
160	163.52	168.28	113.02	274.28	164.92	253.09	337.96	214.44	233.02	213.61
170	139.68	171.06	114.15	286.85	182.41	273.58	335.15	212.99	235.01	216.76
180	139.87	171.06	114.10	328.50	232.64	302.18	334.39	211.53	238.47	230.30
190	141.22	182.92	123.16	401.74	278.18	317.14	331.32	205.87	240.99	246.95
200	149.53	181.58	129.46	472.77	352.42	357.66	330.62	207.93	243.59	269.51
210	171.45	178.99	133.26	485.26	408.48	398.65	328.55	297.68	246.47	294.31
220	274.96	174.09	155.09	523.20	427.38	412.49	324.54	388.53	248.87	325.46
230	379.84	160.35	165.16	543.93	440.18	404.51	318.42	415.61	251.88	342.21
240	369.78	164.40	194.81	572.87	457.57	447.79	312.46	437.02	247.92	356.07
250	361.37	187.78	196.73	619.67	483.10	478.45	307.29	453.18	244.47	370.23
260	351.14	372.16	210.84	639.00	503.91	480.52	307.37	439.23	241.05	393.91
270	380.38	367.22	230.82	664.10	507.07	520.79	316.50	473.49	250.68	412.34

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	ตำแหน่งบริเวณกลางห้องเผาถ่านบน									
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	เฉลี่ย
280	450.39	349.97	235.10	671.95	520.58	585.11	350.88	486.14	255.18	433.92
290	472.61	331.11	272.56	693.22	523.86	669.57	503.81	491.81	257.03	468.40
300	489.34	342.04	287.69	694.25	553.94	669.45	528.32	570.21	257.69	488.10
310	490.51	354.29	369.80	688.17	585.34	683.76	538.62	577.46	245.09	503.67
320	468.22	371.79	424.11	714.06	608.90	709.26	537.70	591.90	260.32	520.70
330	450.42	356.92	411.37	707.91	622.83	724.82	557.59	644.60	417.53	543.78
340	431.97	397.75	498.93	742.81	656.58	698.85	557.25	712.59	458.81	572.84
350	447.02	440.92	600.06	764.88	678.98	722.93	648.57	718.52	471.70	610.40
360	473.45	445.44	594.80	766.02	718.54	710.73	668.07	720.41	505.78	622.58
370	457.50	468.66	618.22	788.82	726.68	722.94	659.58	756.30	509.54	634.25
380	472.52	503.24	609.34	793.13	726.01	763.30	673.94	738.39	531.56	645.71
390	503.34	522.36	619.78	806.88	746.40	769.01	727.27	750.88	549.00	666.10
400	532.13	542.48	616.71	819.74	761.88	793.57	705.74	784.97	572.43	681.07
410	554.34	522.95	617.10	822.29	771.57	776.80	719.33	804.23	645.15	692.64
420	578.96	645.10	625.02	804.75	778.51	784.13	752.10	791.99	628.11	709.85
430	580.75	647.83	658.76	824.67	784.53	797.61	772.41	832.07	658.23	728.54
440	574.88	616.88	681.17	816.21	784.79	801.32	776.71	827.09	651.56	725.62
450	617.38	652.01	665.69	838.68	800.63	818.76	799.42	831.20	692.97	746.30
460	636.50	627.92	656.81	852.97	825.21	835.60	785.36	862.37	716.28	755.45
470	619.84	712.84	633.92	851.68	810.07	831.29	820.16	829.92	748.76	762.05
480	670.30	704.13	673.01	877.41	816.49	818.16	811.93	865.01	746.08	775.83
490	698.99	672.58	671.54	877.67	817.54	836.59	820.98	840.99	774.40	779.03
500	727.62	659.81	708.52	892.73	811.68	841.16	857.17	817.83	765.50	786.89
510	726.79	639.58	718.81	876.49	840.09	858.70	842.86	833.61	773.78	790.08
520	748.11	732.75	735.89	890.07	837.78	872.57	848.85	872.01	761.20	811.03
530	745.60	763.01	733.39	899.27	860.33	881.43	859.44	903.90	767.78	823.79
540	769.22	806.91	736.41	902.05	860.69	898.93	861.04	931.04	788.45	839.42
550	790.20	837.83	750.65	915.80	860.55	925.00	892.17	866.42	787.53	847.35

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	ตำแหน่งบริเวณกลางห้องเผาถ่านบน									
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	เฉลี่ย
560	798.98	799.33	751.45	894.53	843.23	899.53	863.90	869.76	804.44	836.13
570	798.78	771.61	753.31	866.41	852.50	871.06	891.70	916.43	806.89	836.52
580	785.84	811.73	761.73	888.65	866.19	915.37	896.23	907.67	821.70	850.57
590	811.91	858.40	768.14	902.01	860.15	912.98	863.19	885.11	834.84	855.19
600	837.70	834.74	770.34	906.43	881.59	925.26	892.13	951.38	816.30	868.43
610	846.65	852.31	790.37	899.28	867.20	920.03	863.16	949.39	833.20	869.07
620	838.89	885.62	787.55	904.58	885.90	925.57	842.86	894.61	833.70	866.59
630	855.11	860.66	793.36	931.23	897.13	914.24	861.13	893.42	842.11	872.04
640	868.81	868.28	800.87	956.07	873.79	937.54	890.74	904.29	840.80	882.35
650	877.72	900.07	815.80	962.89	887.53	924.12	899.82	961.75	823.41	894.79
660	878.39	901.00	820.40	966.11	880.79	939.55	917.13	942.79	851.31	899.72
670	883.14	900.91	822.23	969.70	917.61	941.90	901.64	909.38	903.03	905.50
680	882.10	915.39	823.95	974.13	905.13	952.74	907.72	932.12	915.76	912.11
690	909.54	892.80	822.86	961.09	920.08	939.67	920.43	973.60	908.22	916.48
700	901.18	917.50	817.44	989.88	928.82	950.72	926.41	916.29	952.59	922.31
710	913.92	912.02	814.54	969.05	925.58	960.07	898.84	957.66	894.14	916.20
720	915.51	905.59	804.34	929.05	902.72	930.02	918.86	999.86	937.29	915.92

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการวัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาอิฐ 10 ตำแหน่ง ครั้งที่ 1

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
0	137.63	140.30	135.40	114.66	100.22	112.84	50.13	46.93	41.77	154.54
10	183.14	159.33	211.75	140.57	111.23	136.68	52.79	47.54	46.16	219.49
20	294.22	255.80	308.49	201.44	138.63	204.12	55.44	52.93	65.52	381.37
30	304.59	282.73	300.49	231.10	174.60	231.30	56.55	58.74	70.25	383.13
40	313.26	299.32	309.87	254.40	201.22	245.76	59.12	67.60	77.36	366.66
50	301.96	296.76	296.50	257.63	209.05	254.28	61.76	79.45	82.44	345.25
60	286.14	288.51	281.44	253.63	208.44	256.26	64.56	82.78	83.43	322.48
70	272.40	281.43	269.22	245.13	212.05	255.48	66.47	85.45	85.07	305.12
80	323.49	314.15	316.54	276.08	238.16	272.12	70.10	95.54	91.64	353.75
90	304.91	309.90	301.74	271.68	235.11	278.95	72.44	99.19	95.58	349.12
100	296.14	305.24	296.48	266.58	234.35	280.20	72.83	100.67	97.22	330.41
110	343.48	344.13	364.03	298.20	256.62	304.80	78.69	109.47	103.63	412.44
120	336.07	345.78	342.52	299.02	260.55	310.98	81.07	113.51	110.09	390.17
130	361.15	360.09	380.50	309.92	272.80	316.76	83.09	116.46	111.58	391.45
140	354.38	360.39	336.99	312.02	278.91	320.73	84.18	118.35	114.95	382.69
150	358.93	367.89	344.25	318.29	281.59	327.18	86.43	119.65	113.39	399.67
160	370.58	378.80	361.71	327.02	290.10	336.76	90.78	118.80	103.95	426.36
170	391.45	395.11	384.17	339.33	302.22	353.30	98.24	123.62	103.39	457.82
180	420.87	424.05	411.87	362.97	315.04	374.38	100.78	128.57	108.09	512.49
190	441.76	441.12	445.36	374.40	326.92	396.08	101.34	135.12	115.83	527.44
200	466.78	460.09	470.24	391.47	340.60	416.45	104.97	140.28	118.45	554.04
210	459.56	463.61	438.75	402.46	348.53	426.57	113.39	144.70	120.43	530.87
220	513.10	503.74	532.64	430.73	357.47	463.01	122.23	148.23	127.56	657.80
230	520.49	515.97	485.40	446.29	368.94	484.15	137.35	158.90	141.77	566.06
240	529.08	526.09	514.25	452.14	376.22	499.27	135.06	163.64	145.83	602.34
250	526.41	539.10	517.65	462.25	398.97	505.10	147.51	169.56	154.15	625.21
260	536.99	548.22	529.58	468.84	408.87	519.67	160.13	177.61	163.91	661.21
270	532.85	551.18	497.98	477.71	422.54	517.09	177.04	182.95	164.65	616.82

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
280	553.83	565.98	538.88	493.69	446.00	529.60	194.86	193.90	176.44	663.94
290	561.39	576.11	553.11	503.72	447.00	540.13	205.18	204.48	186.18	647.19
300	605.19	600.69	565.22	524.47	457.98	558.61	223.91	213.40	196.04	686.61
310	609.17	616.71	680.80	538.63	498.66	572.22	240.60	226.01	207.22	693.82
320	620.69	625.70	625.99	547.35	502.47	589.33	254.71	236.94	216.35	715.28
330	618.75	636.78	615.90	553.77	512.61	592.99	257.29	241.82	235.01	718.97
340	635.35	650.36	598.61	565.36	512.77	604.35	275.40	251.73	254.49	718.26
350	651.73	666.20	641.84	578.09	516.52	627.54	295.55	263.40	253.70	758.10
360	670.92	680.74	639.85	593.01	520.49	638.35	313.93	280.62	268.59	761.22
370	684.07	695.59	656.47	601.62	529.93	654.64	324.53	289.63	272.72	779.08
380	716.12	720.61	669.54	623.59	535.27	673.36	338.76	298.81	284.98	802.54
390	685.31	710.57	647.66	615.93	544.86	672.49	344.79	313.38	310.75	760.77
400	723.15	737.00	680.46	634.19	557.24	696.21	356.81	322.86	315.55	824.53
410	731.68	760.09	722.77	646.61	565.94	724.16	375.95	331.65	315.82	863.86
420	756.78	799.66	733.91	664.01	579.87	745.36	387.52	343.99	351.34	875.12
430	806.61	839.02	737.54	694.79	600.75	762.21	369.65	349.83	387.22	890.18
440	789.78	826.74	729.70	704.22	614.03	772.57	330.81	345.79	401.17	879.20
450	802.28	833.96	743.19	711.42	620.06	782.53	350.16	346.47	417.05	898.15
460	819.54	843.05	742.19	727.18	632.15	794.88	385.36	357.45	428.99	902.69
470	827.69	860.43	770.29	738.82	652.49	815.53	380.41	354.99	392.72	943.06
480	828.85	868.56	765.18	746.14	667.17	827.60	379.28	368.90	432.77	929.47
490	838.58	882.35	798.94	754.92	694.57	851.77	385.03	370.29	433.62	978.71
500	861.56	896.09	796.77	768.28	705.10	862.95	410.51	376.75	439.33	985.38
510	864.65	904.52	796.94	775.92	729.25	866.95	423.09	392.39	453.15	967.08
520	864.49	908.54	799.69	782.80	725.47	872.29	457.09	410.51	502.76	965.19
530	878.05	915.83	821.64	793.37	721.47	898.08	482.69	427.93	531.78	997.14
540	881.37	921.86	836.23	801.30	762.77	893.81	494.30	435.51	487.69	986.33
550	889.20	929.32	853.98	811.36	748.45	914.48	543.85	469.03	627.60	1005.18

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
560	898.65	939.17	850.59	820.30	758.86	912.93	530.19	475.12	542.00	1000.27
570	900.78	942.96	819.75	824.39	763.26	914.33	532.13	469.31	494.30	1000.43
580	899.62	941.87	822.46	827.36	766.45	923.17	541.95	481.57	516.82	1001.39
590	916.54	956.43	826.87	839.85	770.71	921.88	534.66	468.22	497.67	1010.64
600	920.81	957.74	855.93	849.33	777.34	953.02	580.49	491.35	517.18	1049.38
610	921.26	963.26	855.88	852.78	785.63	968.60	606.69	519.47	599.35	1066.10
620	927.82	973.05	856.53	863.01	866.98	962.40	610.18	525.95	554.54	1041.67
630	930.27	973.23	976.49	865.77	839.68	962.45	620.23	541.83	577.18	1040.36
640	925.71	969.00	860.55	867.11	834.88	965.28	611.75	541.70	562.60	1043.89
650	930.03	971.37	860.08	872.05	837.02	963.73	622.06	551.67	570.52	1038.26
660	913.41	957.58	824.30	862.68	839.15	939.96	605.86	535.90	541.00	973.35

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลการวัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาอิฐ 10 ตำแหน่ง ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
0	176.35	167.33	160.27	152.29	143.22	142.30	62.07	67.91	68.19	191.36
10	329.45	360.86	374.01	211.71	236.22	199.05	65.87	77.14	79.50	404.81
20	439.13	380.00	464.16	285.31	346.63	291.95	73.62	133.34	99.48	630.40
30	413.03	390.00	420.80	324.70	347.92	338.40	79.62	137.42	108.33	512.58
40	397.79	380.54	402.13	340.00	338.90	350.01	86.70	139.78	133.15	462.64
50	417.07	399.26	425.95	357.61	356.50	363.82	91.64	141.70	139.38	487.50
60	411.84	385.02	404.14	358.66	348.47	368.55	94.56	144.28	168.26	460.25
70	426.69	401.59	422.10	372.51	363.89	378.58	99.47	155.92	171.49	480.35
80	429.12	411.60	438.35	377.59	376.13	388.04	101.65	157.36	174.41	496.04
90	418.42	393.80	407.04	374.73	365.69	393.34	102.67	159.23	176.86	464.53
100	462.03	416.76	443.81	395.25	384.35	399.14	103.35	161.18	204.14	495.48
110	461.25	423.53	450.27	405.61	394.79	412.19	109.51	172.99	214.24	516.20
120	475.32	439.15	462.02	387.59	405.50	423.35	112.74	175.21	227.19	533.58
130	476.24	434.26	454.52	391.81	403.23	432.56	116.60	188.38	230.76	524.77
140	477.87	443.49	465.09	397.03	417.11	443.03	120.66	192.16	224.57	531.77
150	494.12	457.06	485.89	409.41	425.80	456.07	128.85	194.64	220.64	550.44
160	520.99	487.05	525.56	428.43	450.84	474.17	135.25	199.09	257.98	608.34
170	530.29	496.66	528.09	437.69	465.53	488.03	140.34	202.36	264.92	605.27
180	538.64	503.95	529.10	449.10	474.88	500.18	145.27	207.17	263.07	609.86
190	566.39	527.68	548.86	472.84	494.48	514.69	160.16	211.07	270.21	635.01
200	559.23	517.80	581.21	453.60	492.55	517.58	163.62	217.28	300.96	612.76
210	565.19	523.23	604.36	454.01	499.82	524.02	168.65	221.61	299.94	628.44
220	602.36	545.32	621.47	478.00	506.47	533.81	175.06	225.65	304.71	650.34
230	624.13	578.85	655.51	497.68	534.03	554.92	187.35	230.62	323.73	704.35
240	620.11	570.27	636.26	501.86	543.25	563.45	196.48	236.98	323.09	678.79
250	666.08	568.66	642.45	511.97	547.56	573.38	213.47	241.84	322.39	689.28
260	666.63	586.29	710.20	510.36	562.76	579.48	216.58	250.27	350.90	700.17
270	702.35	604.63	687.99	526.02	579.64	600.41	229.72	256.05	352.18	725.01

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

เวลา (นาฬิกา)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
280	711.81	610.90	681.53	537.14	589.50	613.06	236.82	263.56	354.73	728.83
290	734.36	639.45	713.35	555.85	639.27	640.26	255.11	292.69	376.50	794.99
300	766.34	676.40	795.01	579.09	672.30	667.78	271.04	284.35	395.73	836.65
310	771.54	656.01	834.56	573.56	658.66	674.57	273.99	295.90	383.58	800.02
320	788.84	683.16	918.47	583.73	682.05	692.81	281.55	303.23	409.34	860.85
330	806.39	697.53	818.06	600.15	698.21	713.46	291.73	312.78	420.50	873.14
340	796.39	681.37	787.49	600.38	687.35	718.22	300.21	319.98	435.84	814.70
350	821.87	751.65	830.67	618.41	714.26	740.72	311.90	329.51	447.89	880.67
360	843.20	772.73	841.95	632.43	728.43	753.92	322.70	339.32	465.29	892.08
370	859.76	785.89	859.66	651.31	744.21	776.71	339.89	352.59	483.99	915.49
380	864.22	794.10	895.14	656.53	756.63	786.27	350.31	367.90	494.78	918.63
390	871.35	796.49	864.39	662.93	752.72	788.36	357.86	379.44	482.91	914.30
400	955.39	818.35	934.51	681.72	776.80	810.11	371.69	414.18	489.98	958.30
410	962.69	825.90	938.88	694.38	790.05	833.46	391.10	425.91	541.64	957.69
420	970.87	833.19	941.15	703.03	795.92	840.17	402.23	438.65	543.34	971.89
430	990.69	887.34	968.65	722.62	824.65	867.29	421.92	456.56	548.10	990.74
440	999.58	887.34	973.11	732.40	834.24	886.35	441.67	472.48	580.24	1027.01
450	997.75	865.52	957.60	733.74	828.45	890.68	450.65	472.65	600.90	985.85
460	980.96	841.26	941.31	724.12	811.83	878.95	449.85	536.69	615.39	934.62
470	1010.52	897.19	980.70	743.82	834.94	888.47	462.49	549.06	622.03	994.44
480	1024.39	908.78	1111.16	757.26	840.77	897.05	477.34	542.25	621.28	1001.66
490	1058.91	928.40	987.59	771.25	859.80	914.35	493.18	575.02	666.45	1027.70
500	1061.65	930.22	1011.61	766.58	862.96	922.46	502.23	579.53	642.93	1035.05
510	1069.90	931.53	1016.11	774.03	850.87	920.26	506.07	570.30	626.05	998.60
520	1070.54	948.11	1023.73	777.29	881.16	933.24	521.92	580.83	648.46	1053.46
530	1086.92	960.61	1030.21	790.19	885.98	944.32	530.15	593.07	648.53	1042.58
540	1087.66	955.59	1027.42	797.20	871.93	951.60	546.53	614.83	693.22	1047.19
550	1093.31	957.33	1027.64	801.16	876.25	954.68	554.41	621.15	682.47	1040.30

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
560	1081.55	944.48	996.56	797.51	824.03	954.65	559.19	627.27	687.80	1029.38
570	1069.64	927.61	974.04	790.40	821.72	947.27	555.08	626.22	686.31	998.36
580	1055.21	909.07	950.48	780.18	804.31	931.32	546.60	618.68	674.66	960.10
590	1036.10	883.68	920.82	766.27	785.47	910.14	532.59	608.54	649.20	918.07
600	1019.76	863.22	899.60	752.64	763.36	888.90	520.68	598.93	634.75	887.50

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright © by Chiang Mai University
 All rights reserved

ตาราง ก.4 ข้อมูลการคำนวณเชิงตัวเลขของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกลางเตาด้าน บน กลาง และ
ล่างอัตราการไหลของอากาศ 200 kg/hr ที่อุณหภูมิเผา 800, 900, 1,000 °C

เวลา (นาทีก)	800°C			900°C			1000°C		
	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
0	345.52	319.48	197.12	345.52	319.48	197.12	345.52	319.48	197.12
31	345.52	319.48	197.12	345.52	319.48	197.12	345.52	319.48	197.12
62	374.48	342.17	213.55	374.48	342.17	213.55	374.48	342.17	213.55
93	397.80	364.98	230.47	397.80	364.98	230.47	397.80	364.98	230.47
124	427.20	393.18	249.86	427.20	393.18	249.86	427.20	393.18	249.86
155	461.33	425.50	271.15	461.33	425.50	271.15	461.33	425.50	271.15
186	499.02	460.95	293.88	499.02	460.95	293.88	499.02	460.95	293.88
217	539.11	498.51	317.59	539.11	498.51	317.59	539.11	498.51	317.59
248	580.44	537.16	341.83	580.44	537.16	341.83	580.44	537.16	341.83
279	622.60	576.56	366.43	622.60	576.56	366.43	622.60	576.56	366.43
310	659.44	611.28	389.07	663.28	614.66	390.53	663.28	614.66	390.53
341	671.65	624.33	402.41	702.43	651.44	414.10	702.43	651.44	414.10
372	675.27	629.89	412.28	737.74	684.86	436.30	737.74	684.86	436.30
403	678.63	635.17	421.73	756.88	704.07	452.49	769.15	714.87	457.08
434	681.87	640.24	430.81	760.71	709.84	462.82	794.73	739.78	475.71
466	685.00	645.11	439.53	764.17	715.29	472.72	814.05	759.17	491.97
497	688.02	649.80	447.93	767.51	720.53	482.24	845.48	789.26	512.70
528	690.94	654.31	456.02	770.75	725.59	491.42	849.50	795.08	523.08
559	693.77	658.66	463.81	773.88	730.47	500.28	852.95	800.49	533.02
590	696.51	662.85	471.34	776.92	735.17	508.83	856.28	805.71	542.62
621	699.16	666.88	478.60	779.87	739.72	517.09	859.52	810.77	551.90
652	701.72	670.78	485.62	782.72	744.11	525.07	862.67	815.65	560.88
683	704.21	674.53	492.41	785.50	748.35	532.80	865.72	820.38	569.56
714	706.62	678.16	498.97	788.19	752.45	540.28	868.69	824.96	577.98
745	708.95	681.66	505.33	790.80	756.42	547.52	871.58	829.39	586.13

ตาราง ก.4 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	800°C			900°C			1000°C		
	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
776	711.22	685.05	511.48	793.34	760.26	554.54	874.39	833.69	594.04
807	713.41	688.32	517.45	795.81	763.98	561.35	877.12	837.85	601.71
838	715.54	691.48	523.23	798.21	767.58	567.96	879.78	841.89	609.16
869	717.61	694.54	528.84	800.54	771.07	574.37	882.36	845.81	616.39
900	719.62	697.50	534.28	802.80	774.45	580.60	884.88	849.61	623.42

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright © by Chiang Mai University
 All rights reserved

ตาราง ก.5 ข้อมูลการคำนวณเชิงตัวเลขของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกลางเตาด้าน บน กลาง และ
ล่างอัตราการไหลของอากาศ 400 kg/hr ที่อุณหภูมิเผา 800, 900, 1,000 °C

เวลา (นาทึ)	800°C			900°C			1000°C		
	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
0	389.19	372.67	291.06	389.19	372.67	291.06	390.07	372.45	291.10
31	389.19	372.67	291.06	389.19	372.67	291.06	390.07	372.45	291.10
62	413.17	393.70	310.19	413.17	393.70	310.19	414.02	393.49	310.21
93	437.68	417.93	331.52	437.68	417.93	331.52	438.56	417.72	331.54
124	469.18	448.71	357.50	469.18	448.71	357.50	470.09	448.48	357.53
155	505.96	484.43	387.03	505.96	484.43	387.03	506.93	484.20	387.06
186	546.72	523.88	419.24	546.72	523.88	419.24	547.75	523.63	419.27
217	590.14	565.84	453.27	590.14	565.84	453.27	591.25	565.57	453.31
248	634.92	609.06	488.23	634.92	609.06	488.23	636.10	608.78	488.28
279	680.61	653.14	523.84	680.61	653.14	523.84	681.86	652.84	523.89
310	720.22	691.51	555.44	724.58	695.61	558.34	725.90	695.30	558.39
341	731.87	703.61	568.43	766.80	736.45	591.72	768.19	736.12	591.78
372	734.06	706.87	575.01	804.66	773.20	622.23	806.10	772.86	622.29
403	736.09	709.96	581.28	824.17	792.71	640.57	839.61	805.48	649.90
434	738.05	712.93	587.29	826.47	796.08	647.40	866.51	831.92	673.14
466	739.93	715.78	593.06	828.56	799.26	653.90	886.34	851.75	691.67
497	741.74	718.53	598.60	830.57	802.32	660.16	920.07	884.60	719.36
528	743.49	721.17	603.93	832.51	805.27	666.18	922.44	888.00	726.19
559	745.18	723.71	609.05	834.39	808.11	671.98	924.47	891.16	732.67
590	746.81	726.16	613.99	836.21	810.86	677.57	926.45	894.20	738.93
621	748.38	728.52	618.75	837.96	813.51	682.96	928.35	897.15	744.96
652	749.90	730.80	623.33	839.66	816.07	688.16	930.20	900.00	750.80
683	751.37	732.99	627.75	841.31	818.54	693.19	932.00	902.76	756.43
714	752.78	735.10	632.02	842.90	820.93	698.05	933.73	905.44	761.89
745	754.15	737.14	636.15	844.44	823.24	702.74	935.42	908.02	767.16

ตาราง ก.5 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	800°C			900°C			1000°C		
	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
776	755.48	739.10	640.13	845.94	825.48	707.28	937.06	910.53	772.27
807	756.76	741.00	643.98	847.38	827.64	711.68	938.64	912.96	777.22
838	758.00	742.83	647.70	848.79	829.73	715.94	940.18	915.31	782.02
869	759.19	744.60	651.31	850.15	831.75	720.06	941.68	917.59	786.67
900	760.35	746.31	654.80	851.46	833.70	724.06	943.13	919.80	791.18

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright © by Chiang Mai University
 All rights reserved

ตาราง ก.6 ข้อมูลการคำนวณเชิงตัวเลขของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกลางเตาด้าน บน กลาง และ
ล่างอัตราการไหลของอากาศ 600 kg/hr ที่อุณหภูมิเผา 800, 900, 1,000 °C

เวลา (นาทีก)	800°C			900°C			1000°C		
	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
0	406.13	392.17	330.01	406.13	392.17	330.01	406.13	392.17	330.01
31	406.13	392.17	330.01	406.13	392.17	330.01	406.13	392.17	330.01
62	428.29	412.30	349.32	428.29	412.30	349.32	428.29	412.30	349.32
93	453.21	436.99	372.08	453.21	436.99	372.08	453.21	436.99	372.08
124	485.44	468.64	400.39	485.44	468.64	400.39	485.44	468.64	400.39
155	523.19	505.53	432.91	523.19	505.53	432.91	523.19	505.53	432.91
186	565.08	546.37	468.62	565.08	546.37	468.62	565.08	546.37	468.62
217	609.74	589.85	506.47	609.74	589.85	506.47	609.74	589.85	506.47
248	655.81	634.66	545.41	655.81	634.66	545.41	655.81	634.66	545.41
279	702.81	680.37	585.10	702.81	680.37	585.10	702.81	680.37	585.10
310	743.43	720.00	619.96	748.00	724.36	623.44	748.00	724.36	623.44
341	754.79	731.71	632.49	791.36	766.61	660.42	791.36	766.61	660.42
372	756.34	734.10	637.45	830.15	804.50	693.92	830.15	804.50	693.92
403	757.78	736.37	642.19	849.73	824.07	712.80	864.34	838.02	723.94
434	759.17	738.55	646.74	851.36	826.54	717.93	891.65	864.98	748.71
466	760.50	740.64	651.12	852.84	828.87	722.82	911.61	884.91	767.84
497	761.78	742.66	655.33	854.26	831.11	727.54	946.10	918.74	798.03
528	763.02	744.60	659.38	855.64	833.27	732.08	947.80	921.22	803.16
559	764.21	746.46	663.28	856.96	835.35	736.46	949.26	923.52	808.02
590	765.35	748.26	667.04	858.24	837.37	740.69	950.67	925.74	812.72
621	766.46	749.99	670.66	859.48	839.31	744.77	952.04	927.89	817.26
652	767.52	751.65	674.15	860.67	841.18	748.72	953.36	929.97	821.66
683	768.55	753.26	677.52	861.83	842.99	752.53	954.64	931.98	825.91
714	769.54	754.80	680.78	862.94	844.74	756.22	955.88	933.93	830.03
745	770.49	756.29	683.92	864.02	846.43	759.78	957.08	935.82	834.02

ตาราง ก.6 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	800°C			900°C			1000°C		
	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง	บน	กลาง	ล่าง
776	771.41	757.73	686.96	865.07	848.06	763.23	958.25	937.64	837.88
807	772.30	759.11	689.89	866.08	849.64	766.57	959.37	939.41	841.63
838	773.16	760.45	692.73	867.05	851.17	769.81	960.47	941.12	845.26
869	773.99	761.74	695.47	868.00	852.64	772.94	961.53	942.78	848.78
900	774.79	762.98	698.13	868.91	854.07	775.97	962.56	944.39	852.20

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright © by Chiang Mai University
 All rights reserved

ตาราง ก.7 ข้อมูลจากการคำนวณเชิงตัวเลขการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ 4 ตำแหน่ง

บริเวณ บน กลาง ล่าง และในก้อนอิฐ ทั้ง 5 แบบจำลอง ที่อัตราการไหลของ

อากาศ 600 kg/hr ที่อุณหภูมิเผา 1,000 °C

ก) แบบจำลองช่องทางออกก๊าซร้อนบริเวณด้านซ้าย-ตรงกลาง

Time (minute)	Left middle				Time (minute)	Left middle			
	top	middle	bottom	brick		top	middle	bottom	brick
0	414.99	404.98	332.82	145.01	466	917.57	892.79	719.83	241.99
31	414.99	404.98	332.82	145.01	497	919.02	894.96	725.16	250.01
62	436.36	424.35	350.15	150.25	528	920.34	897.01	730.25	257.93
93	460.96	448.48	369.86	155.66	559	921.61	899.00	735.19	265.75
124	492.92	479.64	394.55	161.34	590	922.83	900.92	739.98	273.47
155	530.44	516.11	423.02	167.33	621	924.02	902.77	744.62	281.10
186	572.14	556.57	454.36	173.66	652	925.17	904.56	749.12	288.63
217	616.64	599.72	487.63	180.32	683	926.28	906.30	753.49	296.07
248	662.56	644.23	521.92	187.30	714	927.36	907.98	757.74	303.42
279	709.43	689.66	556.92	194.56	745	928.40	909.60	761.86	310.67
310	754.51	733.40	590.79	202.08	776	929.40	911.17	765.86	317.84
341	797.77	775.40	623.52	209.82	807	930.38	912.70	769.76	324.92
372	836.45	813.06	653.30	217.73	838	931.32	914.17	773.54	331.92
403	870.54	846.36	680.09	225.76	869	932.24	915.60	777.22	338.83
434	897.74	873.08	702.39	233.86	900	933.13	916.98	780.81	345.65

All rights reserved

ข) แบบจำลองช่องทางออกก๊าซร้อนบริเวณด้านซ้าย-ล่าง

Time (minute)	Left middle				Time (minute)	Left middle			
	top	middle	bottom	brick		top	middle	bottom	brick
0	413.99	404.32	359.48	148.10	466	916.09	891.99	787.39	291.30
31	413.99	404.32	359.48	148.10	497	950.45	925.60	817.13	302.87
62	435.74	423.85	377.60	156.43	528	952.02	927.86	821.69	314.25
93	460.29	447.98	399.22	164.91	559	953.35	929.95	826.01	325.43
124	492.19	479.12	426.57	173.69	590	954.63	931.97	830.20	336.40
155	529.63	515.56	458.26	182.84	621	955.88	933.93	834.24	347.19
186	571.25	555.99	493.23	192.39	652	957.09	935.82	838.17	357.78
217	615.67	599.10	530.40	202.34	683	958.26	937.65	841.96	368.18
248	661.51	643.57	568.73	212.66	714	959.39	939.43	845.64	378.41
279	708.30	688.97	607.85	223.32	745	960.49	941.14	849.21	388.45
310	753.29	732.67	645.64	234.27	776	961.55	942.81	852.67	398.32
341	796.47	774.65	682.08	245.46	807	962.59	944.42	856.03	408.02
372	835.09	812.28	715.06	256.83	838	963.59	945.98	859.29	417.55
403	869.13	845.56	744.55	268.30	869	964.56	947.50	862.45	426.92
434	896.29	872.28	768.79	279.82	900	965.50	948.96	865.52	436.12

ค) แบบจำลองช่องทางออกก๊าซร้อนบริเวณด้านล่าง-ซ้าย

Time (minute)	Left bottom				Time (minute)	Left bottom			
	top	middle	bottom	brick		top	middle	bottom	brick
0	413.93	404.23	360.89	148.48	466	915.98	891.82	791.14	296.99
31	413.93	404.23	360.89	148.48	497	917.46	894.02	795.59	308.62
62	435.69	423.77	379.08	157.17	528	918.78	896.11	799.84	320.04
93	460.24	447.89	400.81	166.00	559	920.06	898.12	803.95	331.24
124	492.13	479.02	428.31	175.14	590	921.30	900.06	807.92	342.23
155	529.57	515.46	460.18	184.66	621	922.50	901.94	811.76	353.01
186	571.18	555.88	495.35	194.58	652	923.66	903.76	815.48	363.60
217	615.59	598.98	532.75	204.91	683	924.79	905.52	819.08	373.98
248	661.43	643.45	571.31	215.62	714	925.88	907.23	822.57	384.18
279	708.21	688.83	610.66	226.67	745	926.93	908.88	825.95	394.18
310	753.20	732.52	648.66	238.01	776	927.95	910.47	829.22	404.00
341	796.37	774.49	685.31	249.60	807	928.94	912.02	832.40	413.64
372	834.99	812.12	718.48	261.36	838	929.90	913.51	835.48	423.10
403	869.02	845.39	748.12	273.23	869	930.83	914.96	838.47	432.39
434	896.18	872.11	772.48	285.13	900	931.73	916.36	841.37	441.51

ง) แบบจำลองช่องทางออกก๊าซร้อนบริเวณด้านล่าง-ตรงกลาง

Time (minute)	Center bottom				Time (minute)	Center bottom			
	top	middle	bottom	brick		top	middle	bottom	brick
0	413.04	403.22	325.01	156.60	466	914.32	889.96	726.91	431.03
31	413.04	403.22	325.01	156.60	497	915.83	892.21	733.79	450.29
62	434.91	422.87	344.88	174.88	528	917.18	894.34	740.33	468.73
93	459.42	446.94	365.61	193.14	559	918.49	896.40	746.66	486.39
124	491.25	478.02	391.16	211.44	590	919.76	898.38	752.77	503.32
155	528.62	514.37	420.41	229.98	621	920.98	900.31	758.67	519.53
186	570.15	554.70	452.50	248.89	652	922.17	902.17	764.38	535.08
217	614.47	597.70	486.54	268.22	683	923.32	903.97	769.90	549.99
248	660.21	642.06	521.62	287.97	714	924.44	905.71	775.25	564.29
279	706.89	687.35	557.43	308.11	745	925.52	907.39	780.42	578.01
310	751.80	730.94	592.20	328.54	776	926.56	909.02	785.42	591.17
341	794.89	772.81	625.89	349.18	807	927.58	910.60	790.27	603.82
372	833.44	810.37	656.72	369.89	838	928.56	912.13	794.96	615.95
403	867.41	843.58	684.64	390.54	869	929.52	913.62	799.51	627.62
434	894.53	870.26	708.16	410.98	900	930.44	915.05	803.92	638.82

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลอุณหภูมิการเผาก่อนปรับปรุงเปรียบเทียบกับหลังปรับปรุง

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (°C)		เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (°C)	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง		ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
0	200.91	205.61	270	634.25	741.73
10	201.02	232.92	280	645.71	731.12
20	202.35	235.84	290	666.10	797.80
30	202.46	254.52	300	681.07	829.45
40	203.70	264.81	310	692.64	823.57
50	204.03	320.19	320	709.85	882.83
60	213.61	349.03	330	728.54	845.61
70	216.76	338.43	340	725.62	918.04
80	230.30	300.20	350	746.30	918.46
90	246.95	393.37	360	755.45	959.80
100	269.51	399.53	370	762.05	955.63
110	294.31	401.20	380	775.83	972.43
120	325.46	415.61	390	779.03	951.52
130	342.21	457.83	400	786.89	976.48
140	356.07	473.66	410	790.08	1009.02
150	370.23	469.04	420	811.03	979.06
160	393.91	537.65	430	823.79	-
170	412.34	613.08	440	839.42	-
180	433.92	639.55	450	847.35	-
190	468.40	594.05	460	836.13	-
200	488.10	620.70	470	836.52	-
210	503.67	649.82	480	850.57	-
220	520.70	663.74	490	855.19	-
230	543.78	661.50	500	868.43	-
240	572.84	694.73	510	869.07	-
250	610.40	680.78	520	866.59	-
260	622.58	707.91	530	872.04	-

ตารางที่ ก.8 (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
540	882.35	-
550	894.79	-
560	899.72	-
570	922.31	-
580	912.11	-
590	916.48	-

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลอุณหภูมิจุดควบคุมอุณหภูมิบริเวณด้านบน และด้านล่าง หลังปรับปรุง

เวลา	อุณหภูมิ (°C)		เวลา	อุณหภูมิ (°C)	
(นาทีก)	ด้านบน	ด้านล่าง	(นาทีก)	ด้านบน	ด้านล่าง
0	205.61	28.00	260	707.91	208.00
10	232.92	29.00	270	741.73	234.00
20	235.84	30.00	280	731.12	260.00
30	254.52	35.00	290	797.80	280.00
40	264.81	46.00	300	829.45	319.00
50	320.19	50.00	310	823.57	330.00
60	349.03	58.00	320	882.83	340.00
70	338.43	61.00	330	845.61	361.00
80	300.20	70.00	340	918.04	425.00
90	393.37	73.00	350	918.46	433.00
100	399.53	77.00	360	959.80	473.00
110	401.20	80.00	370	955.63	535.00
120	415.61	85.00	380	972.43	590.00
130	457.83	95.00	390	951.52	605.00
140	473.66	105.00	400	985.17	616.00
150	469.04	110.00	410	979.06	654.00
160	537.65	120.00	420	998.19	656.00
170	613.08	130.00	430	976.48	665.00
180	639.55	140.00	440	985.37	697.00
190	594.05	150.00	450	1009.02	700.00
200	620.70	156.00	460	963.43	714.00
210	649.82	170.00	470	983.72	720.00
220	663.74	185.00	480	1009.02	729.00
230	661.50	191.00	490	963.43	740.00
240	694.73	194.00	500	983.72	770.00
250	680.78	198.00			



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบระบบเตาเผาอิฐ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright © by Chiang Mai University

All rights reserved

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการวัดอัตราการไหลของอากาศ 4 ห้องเผา
ที่ความเร็วรอบพัดลม 1,420 rpm

ตำแหน่งวัด	ความเร็วทางเข้า (m/s)			
	ห้องที่ 1	ห้องที่ 2	ห้องที่ 3	ห้องที่ 4
1	1.43	1.60	0.70	1.70
2	1.52	1.50	0.87	1.85
3	1.41	1.56	0.94	1.70
4	1.20	1.23	1.15	1.83
5	1.10	0.90	1.32	1.90
6	1.32	1.00	1.43	1.89
7	1.42	1.40	1.39	1.78
8	1.23	1.50	1.23	1.80
9	1.50	1.20	1.33	1.89
10	1.30	1.34	1.38	1.82
Vavg, (m/s)	1.34	1.32	1.17	1.82
Q, (CFM)	113.74	112.05	99.43	153.80

ความเร็วก๊าซออกปล่อง

ตำแหน่งวัด	Pressure	Vout
	Inch w	m/s
1	0.14	8.29
2	0.15	8.70
3	0.14	8.44
Vavg, (m/s)	0.14	8.48
Q, (CFM)	1615.76	

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการวัดอัตราการไหลของอากาศ

ความเร็วรอบพัดลม 1,420 rpm เพล้าห้องที่ 2

ตำแหน่ง วัด	วัดทางเข้าห้องที่ 1			
	200 °C	500 °C	685 °C	840 °C
1	3.37	2.87	3.35	2.90
2	3.44	3.22	3.33	2.83
3	3.50	3.13	3.37	2.78
4	3.44	3.27	3.45	2.71
5	3.66	2.99	3.25	2.64
6	3.27	3.00	3.09	2.63
7	3.07	2.71	2.99	2.78
8	2.88	2.66	2.92	2.69
9	2.91	2.64	3.18	2.84
10	3.44	2.60	2.70	2.72
Vavg, (m/s)	3.30	2.91	3.16	2.75
Q, (CFM)	279.31	246.36	267.87	233.07
Tin, °C	20.00	30.00	28.00	26.00
Tout, °C	30.00	48.00	49.00	50.00

ความเร็วก๊าซออกปล่อง

อุณหภูมิเผา	200 °C		500 °C		840 °C	
ตำแหน่งวัด	Pitot tube	Vout	Pitot tube	Vout	Pitot tube	Vout
	(Inch w)	(m/s)	(Inch w)	(m/s)	(Inch w)	(m/s)
1	0.357	13.338	0.289	12.001	0.265	11.492
2	0.365	13.487	0.317	12.569	0.292	12.063
3	-	-	0.326	12.746	0.276	11.728
Vavg, (m/s)	0.361	13.413	0.311	12.439	0.278	11.761
Q, (CFM)	-	2555.810	-	2370.212	-	2241.080

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลการวัดอัตราการไหลของอากาศ

ความเร็วรอบพัดลม 1,688 rpm เฝ้าห้องที่ 4

ตำแหน่งวัด	วัดทางเข้าห้องที่ 3			
	383 °C	650 °C	870 °C	1014 °C
1	3.03	2.97	3.16	2.59
2	3.16	3.34	3.13	2.66
3	2.99	3.24	2.97	2.73
4	3.07	3.20	2.81	2.76
5	3.12	3.19	2.83	2.69
6	3.10	3.12	2.74	2.82
7	3.09	3.10	2.67	2.82
8	2.74	3.18	2.61	2.86
9	2.66	2.94	2.53	2.57
10	3.01	2.91	2.74	2.43
Vavg, (m/s)	3.00	3.12	2.82	2.69
Q, (CFM)	253.82	264.15	238.74	228.07
Tin, °C	28.00	30.00	30.00	26.00

ความเร็วก๊าซออกปล่อง

อุณหภูมิเฝ้า	383 °C	650 °C	870 °C	1014 °C
Tamb, °C	28	30	30	26
1	0.494	0.520	0.511	0.485
2	0.504	0.509	0.514	0.499
3	0.511	0.511	0.517	0.465
Pavg	0.503	0.513	0.514	0.483
Vavg, (m/s)	14.546	14.695	14.705	14.254
Q, (CFM)	2771.849	2800.176	2801.993	2716.183

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลการวัดอัตราการไหลของอากาศ

ความเร็วรอบพัดลม 1,688 rpm เฝ้าห้องที่ 1

ตำแหน่งวัด	วัดทางเข้าห้องที่ 4		
	342°C	644°C	875°C
1	3.90	3.48	3.36
2	3.80	3.44	3.86
3	4.60	3.89	3.89
4	4.10	3.76	3.68
5	3.80	3.45	3.67
6	3.90	3.38	3.80
7	3.80	3.47	3.68
8	3.30	3.50	3.34
9	4.10	3.20	3.18
10	4.00	3.02	2.96
Vavg, (m/s)	3.93	3.46	3.54
Q, (CFM)	332.83	292.94	299.97
Tin, °C	28.00	33.00	27.00

ความเร็วก๊าซออกปล่อง

อุณหภูมิเฝ้า	342°C	644°C	875°C
Tamb, °C	28	33	27
1	0.624	0.630	0.625
2	0.605	0.622	0.639
3	0.629	0.613	0.651
Pavg	0.619	0.622	0.638
Vavg, (m/s)	16.141	16.171	16.387
Q, (CFM)	3075.727	3081.515	3122.549

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลการวัดกำลังไฟฟ้า

ก) ความเร็วรอบพัดลม 1,420 rpm

line	P,watt	Amp	Volt	pf.
1	1540.00	4.02	386.00	0.57
2	1800.00	4.23	385.00	0.64
3	1690.00	3.91	388.00	0.64
avg.	1676.67	4.05	386.33	0.62

ข) ความเร็วรอบพัดลม 1,688 rpm

line	P,watt	Amp	Volt	pf.
1	3040.00	5.09	387.00	0.89
2	3160.00	5.27	387.00	0.89
3	3180.00	5.17	389.00	0.91
avg.	3126.67	5.18	387.67	0.90

ค) ความเร็วรอบพัดลม 1,960 rpm

line	P,watt	Amp	Volt	pf.
1	4060.00	6.50	396.00	0.91
2	4810.00	6.78	395.00	0.91
3	4330.00	6.79	396.00	0.93
avg	4400.00	6.69	395.67	0.92



ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการคำนวณ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

1. การออกแบบระบบ

1.1 การคำนวณปริมาตรห้องเผาไหม้ (Chamber)

ในการคำนวณหาปริมาตรห้องเผาไหม้ คิดจากปริมาณความร้อนที่ต้องการในการระเหยน้ำออกจากอิฐทั้งหมด กับประสิทธิภาพเตา แล้วคิดเป็นปริมาตรที่ต้องการสูงสุดต่อชั่วโมง จากการเก็บข้อมูลจริงได้ดังตาราง

ตารางที่ ค-1 น้ำหนักอิฐที่ผ่านกระบวนการต่างๆ

	น้ำหนัก	น้ำหนักน้ำที่หายไป	หมายเหตุ
อิฐเปียก	3.3	-	ออกจากเครื่องรีดดิน
อิฐเข้าเตา	3	0.3	ตากเสร็จแล้ว
อิฐสุก	2.5	0.5	เผาเสร็จแล้ว

$$\text{น้ำที่ระเหยไปต่อก่อน} \quad 0.5(\text{kg}) - 0.3(\text{kg}) = 0.5 \text{ kg}_w/\text{ก้อน}$$

พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ

$$\text{น้ำที่ต้องทำการระเหย} \quad 1,728(\text{ก้อน}) \times 0.5(\text{kg}_w/\text{ก้อน}) = 864 \text{ kg}_w$$

$$\text{พลังงานที่ใช้} \quad Q_{\text{use}} = 864(\text{kg}_w) \times 2,241(\text{kJ/kg}_w) = 1,936.3 \text{ MJ}$$

$$\eta_{th} = 40 \% \quad 1,936.3(\text{MJ}) \times 100/40 = 6,454.34 \text{ MJ}$$

$$\text{ไม้พารา(ไม้ลำไยจะสูงกว่า)} \quad \text{LHV} = 10.143 \text{ MJ/kg (Mois. 45\%)}$$

(ใช้ไม้ยางพาราคิดเนื่องจากไม่มีค่าความร้อนของไม้ลำไยโดยตรง)

$$\text{ใช้ไม้พิน} \quad 6,454.34(\text{MJ})/10.143(\text{MJ/kg}) = 636.34 \text{ kg}_{\text{fuel}}$$

$$\text{ใช้เวลาเผาประมาณ} \quad = 6 \text{ hr.}$$

$$1 \text{ ชั่วโมงใช้ไม้พิน} \quad 636.34(\text{kg}_{\text{fuel}}) / 6(\text{hr}) = 106.06 \text{ kg}_{\text{fuel}}/\text{hr}$$

$$\text{ความหนาแน่นของกองไม้ลำไย} (\rho_{\text{longang}}) = 350 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{ใช้ปริมาตรห้องเผา} \quad 106.06(\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{hr}) / 350 (\text{kg/m}^3) = 0.30 \text{ m}^3/\text{hr}$$

1.2 คำนวณปริมาณลมที่ต้องการ (Flow rate)

ในการคำนวณจะคิดจากปริมาณอากาศที่ต้องการในการสันดาปกับเชื้อเพลิง และปริมาณอากาศส่วนเกินที่ต้องการในกระบวนการเผาไหม้ แล้วเผื่อค่าพลังงานที่สูญเสียในระบบเนื่องจากการไหลผ่านท่อ และกองอิฐ

ปริมาตรห้องเผา		$= 40 \text{ m}^3$
พลังงานที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำ		
น้ำที่ต้องทำการระเหย	$1,728 \text{ ก้อน} \times 0.5 \text{ kg}_w/\text{ก้อน}$	$= 864 \text{ kg}_w$
พลังงานที่ใช้	Q_{use}	$= 864 \text{ kg}_w \times 2,241 \text{ kJ/kg}_w$ $= 1,936.3 \text{ MJ}$
$\eta_{\text{th}} = 30 \%$	$1,936.3 \text{ MJ} \times 100/30$	$= 6,454.34 \text{ MJ}$
ไม้พารา(ไม้ลำไยจะสูงกว่า) HHV 10.143 MJ/kg Mois 45%		
ต้องการอากาศสันดาป		$= 2.998 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
(จากการสมดุลสมการเคมี)		
Excess air 100 %	$2.998 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}} \times 2$	$= 5.996 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
พื้นที่ต้องใช้	$6,454.34 \text{ MJ} / 10.143 \text{ MJ/kg}$	$= 636.34 \text{ kg}_{\text{fuel}} / 6 \text{ hr.}$ $= 106.06 \text{ kg}_{\text{fuel}}/\text{hr.}$
ใช้อากาศสันดาป	$5.996 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}} \times 106.06 \text{ kg}_{\text{fuel}}/\text{hr.}$	$= 635.93 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{hr.}$
ใช้ทั้งหมด 4 ห้องเผาไหม้	$635.93 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{hr.} \times 4 \text{ ห้อง}$	$= 2,543.72 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{hr.}$
ความหนาแน่นอากาศที่ $p_{\text{at } 80 \text{ } ^\circ\text{C}}$	$0.995 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{m}^3$	$= 2,543.72 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{hr.} / 0.995 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{m}^3$ $= 2,557 \text{ m}^3/\text{hr.}$ $= 1,504.79 \text{ CFM}$
เผื่อค่าพลังงานในการไหลผ่านกองอิฐ ในท่อ รั่ว และบางกระบวนการที่ต้องการอากาศส่วนเกินในปริมาณสูง		$= 4,000 \text{ CFM}$

1.3 คำนวณความดันตกคร่อมในระบบ (Pressure drop in system)

ในระบบเตาเผาอิฐแบบประหยัดพลังงานนี้มีทั้งหมด 4 ห้องเผา ต้องมีการเชื่อมต่อทางเดินอากาศต่อกันเพื่อให้ในระบบมีการนำพลังงานกลับไปใช้ใหม่ได้อย่างทั่วถึงกัน การคิดความดันตกคร่อมระบบเพื่อไปเลือกขนาดพัดลมที่ต้องนำมาใช้ในการดูดอากาศออก

ทางเดินท่อสี่เหลี่ยม 30x30 เซนติเมตร

$$\text{Hydraulic diameter} = 4 \times (0.3 \times 0.3) / 2 \times (0.3 + 0.3) = 0.3$$

$$\text{จาก } \frac{\Delta P}{\rho} = h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2}$$

จากตารางความขรุขระสัมพัทธ์ของท่อเหล็กชุบสังกะสี (Galvanized iron) ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร

$$\text{ได้ค่า } \frac{e}{D} = 0.000154$$

$$\text{จาก } \text{Re} = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu}$$

แทนค่าคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 300 K

$$\begin{aligned} \text{Re} &= 1.16 \times 9.5 \times 0.3 / 184.6 \times 10^{-7} \\ &= 188515.71 \end{aligned}$$

จากตารางแฟกเตอร์ความเสียดทานสำหรับการไหลในท่อโดยใช้ค่า Re กับ e/D ได้ 0.027

จากสูตรคำนวณความสูญเสียจากความขรุขระได้

$$h_l = 0.027 \left(\frac{24}{0.3} \right) \left(\frac{9.5^2}{2} \right) = 97.47 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

ความสูญเสียจากท่องอ โดยจากกราฟความยาวตัดเทียบท่องอ 90° ได้ $L_c/D = 40$

$$h_{lm} = 0.027 (40) \left(\frac{9.5^2}{2} \right) (10) = 487.35 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= \rho (h_l + h_{lm}) = 1.16 (97.47 + 487.35) \\ &= 678.4 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

จากคำนวณเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม CFDRC ได้ความดันตกคร่อมกองอิฐ 10 N/m^2

$$4 \text{ ท่อ} = 40 \text{ N/m}^2$$

รวมความดันตกคร่อมทั้งระบบ

$$678.4 + 40 = 718.4 \text{ N/m}^2$$

$$\text{ประมาณ} = 3 \text{ นิ้วน้ำ}$$

2. การเพิ่มปริมาณของพัดลม

จากความสัมพันธ์ของพัดลม

$$\frac{Power_1}{Power_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3 = \frac{Dim._2}{Dim._1} = \frac{Q_1}{Q_2}$$

จากระบบเดิมใช้ มอเตอร์ขนาด 5 HP (3.7 kW, 1,420 rpm) เมื่อต่อระบบจริงโดยมีความต้านทานของระบบทำให้อัตราการไหลลดลง มอเตอร์ใช้กำลังไฟฟ้าลดลงเหลือ 1.6 kW โดยมีอัตราการไหลของอากาศ 383.26 kg/hr ซึ่งต้องการ 600 kg/hr

$$\frac{600 \text{ kg/hr}}{383.26 \text{ kg/hr}} = \frac{N_2}{1,420 \text{ rpm}}$$

ความเร็วรอบที่ต้องการเพิ่มเป็น

$$N_2 = 2,223 \text{ rpm}$$

จึงใช้มอเตอร์ 7 HP (5.5 kW, 2,800 rpm)

คิดที่โหลดสูงสุดสามารถเพิ่มความเร็วรอบได้

$$\frac{5.5 \text{ kW}}{1.6 \text{ kW}} = \left(\frac{N_2}{1,420} \right)^3$$

$$N_2 = 2,143 \text{ rpm}$$

จากการคำนวณจะเห็นว่ามอเตอร์ 7 แรงม้า ยังไม่สามารถเพิ่มรอบได้ที่ต้องการแต่เนื่องจากราคามอเตอร์มีราคาแพงจึงเลือกใช้ 7 แรงม้า เพราะให้ความเร็วรอบที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการเพื่อค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ซึ่งอาจใช้กำลังไฟฟ้าลดลงเล็กน้อยจากการคำนวณจึงเลือกใช้อัตราทดผู้ละ 3.5:5 นิ้ว

สามารถเพิ่มรอบได้เป็น

$$\frac{5 \text{ inch}}{3.5 \text{ inch}} = \frac{2,800}{N_2}$$

$$N_2 = 1,960 \text{ rpm}$$

จะทำให้ได้อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นเป็น

$$\frac{1,960 \text{ rpm}}{1,420 \text{ rpm}} = \frac{N_2}{383.26 \text{ kg/hr}}$$

$$N_2 = 529 \text{ kg/hr}$$



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

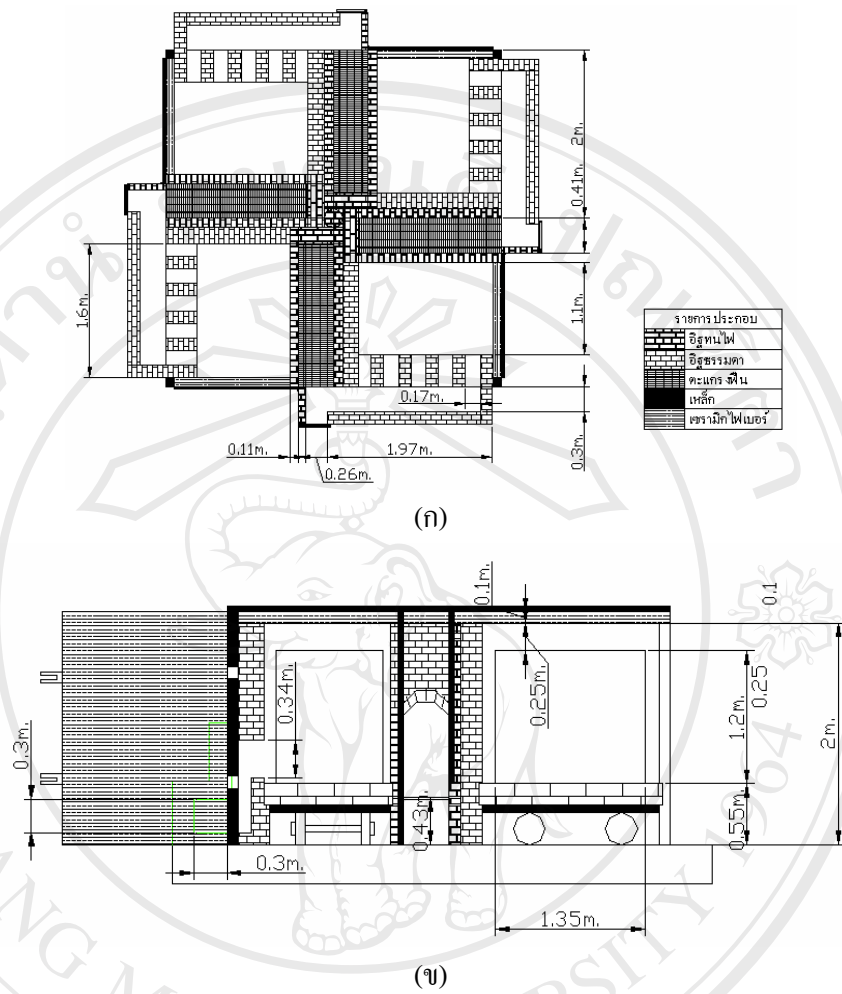
ง.1 การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข

การคำนวณเชิงตัวเลขขั้นแรกจะต้องสร้างโดเมนในการคำนวณขึ้นมาก่อน ซึ่งโดเมนในการคำนวณในโครงการวิจัยนี้คือ การสร้างโดเมนที่มีลักษณะเป็นห้องเผา (เฉพาะบริเวณที่สนใจในที่นี้จะจำลองเฉพาะห้องเผาอิฐห้องเดียว) โดยมีความคล้ายคลึงทางด้านขนาดขนาด และรูปร่าง ที่เหมือนกันกับเตาของจริง ในงานวิจัยได้เลือกจำลองแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยในการจำลองนั้นจะทำการคำนวณผลจากโมเดลที่กำหนดไว้ทั้งหมด 9 โมเดลการทดลอง ซึ่งแต่ละโมเดลที่มีการจำลองแบบ 2 มิติ จะมีการเก็บข้อมูลจริงเพื่อเปรียบเทียบผลอยู่แล้ว ส่วนแบบจำลอง 3 มิติ จะศึกษาถึงปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นเท่านั้น

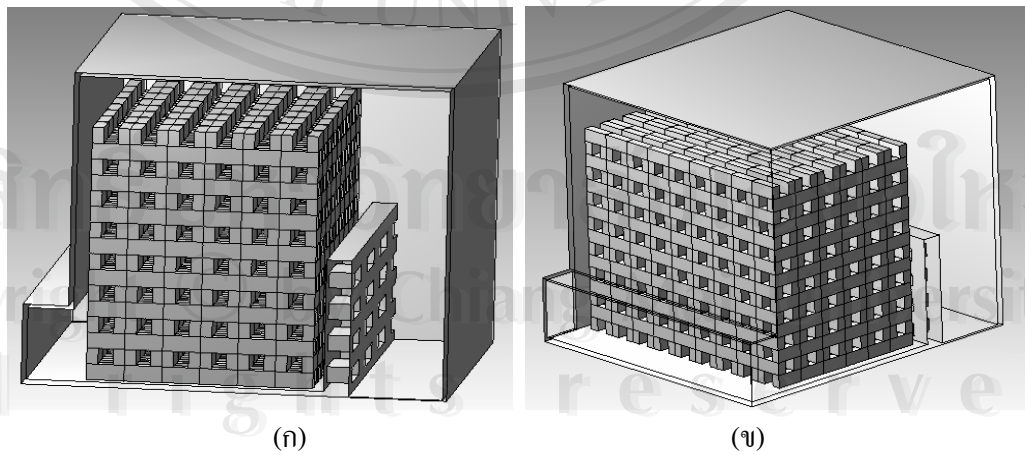
ในการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข โดยการใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล CFDRC[®] สามารถแบ่งขั้นตอนการสร้างออกได้เป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ ขั้นตอนแรกขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-Processing) ขั้นตอนที่สองคือขั้นตอนการประมวลผล (Processing) และขั้นตอนสุดท้ายคือ ขั้นตอนหลังการประมวลผล (Post-Processing) ต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

ง.1.1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-Processing)

ในขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-processing) นี้ คือ การสร้างแบบโดเมนออกมาเป็นแบบรูปภาพ (Drawing) โดยวิธีการสร้างหรือวาดนั้นจะสร้างจากโปรแกรม CFD-GEOM ซึ่งเป็นโปรแกรมในชุดของโปรแกรม CFDRC[®] เองโดยการกำหนดจุดและลากเส้นเพื่อวาดรูปตามขนาดจริงของห้องเผา ในงานวิจัยนี้ลักษณะของเตาเผาอิฐประหยัดพลังงานจะมี 4 ห้องเผา มีท่ออากาศร้อนเชื่อมต่อกันระหว่างห้องเพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่อย่างคุ้มค่าก่อนที่จะทิ้งออกสู่บรรยากาศ โดยแต่ละห้องอุณหภูมิจะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งสอดคล้องกับกระบวนการเผาอิฐในแต่ละห้อง รายละเอียดหลักการทำงานได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 ในการสร้างแบบจำลองในการศึกษาถึงการกระจายตัวของอุณหภูมินั้นเนื่องจากการทำงาน วัสดุโครงสร้าง และขนาด เหมือนกันทุกห้องดังรูปที่ ง.1 จึงสร้างแบบจำลองเป็นตัวแทนเพียงห้องเดียว และทำการคำนวณที่กระบวนการเผาอิฐเท่านั้น

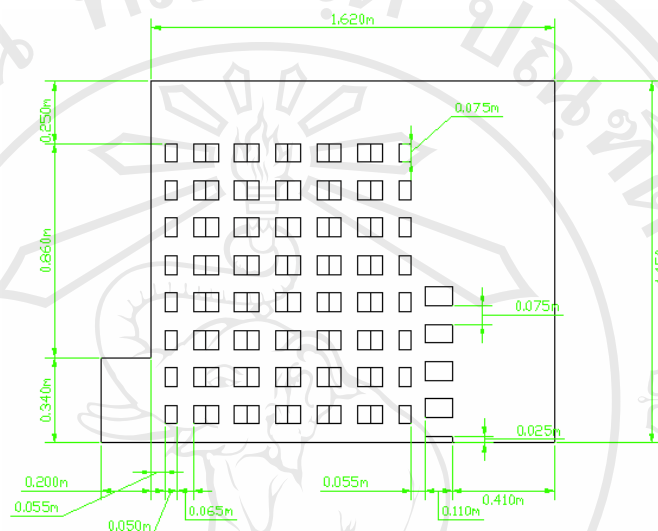


รูปที่ ง.1 แสดงขนาดของเตาเผาอิฐ 4 ห้องเผา (ก) รูปด้านบน, (ข) รูปด้านหน้า



รูปที่ ง.2 แสดงลักษณะของห้องเผาอิฐ (ก), (ข) รูปแบบ 3 มิติ ห้องเผาเดียวแสดงปริมาตรภายในห้องเผา

ในงานวิจัยนี้ห้องเผามีการไหลของอากาศร้อนที่มีลักษณะที่กึ่งสมมาตรคือ มีลักษณะการไหลที่เหมือนกันจากด้านหน้าไปสู่ด้านหลังตามแนวความลึกและก๊าซร้อนที่จะวิ่งจากทางด้านล่างขวามือตามรูปผ่านไปยังห้องเผาและออกไปทางด้านล่างซ้ายของห้องเผา



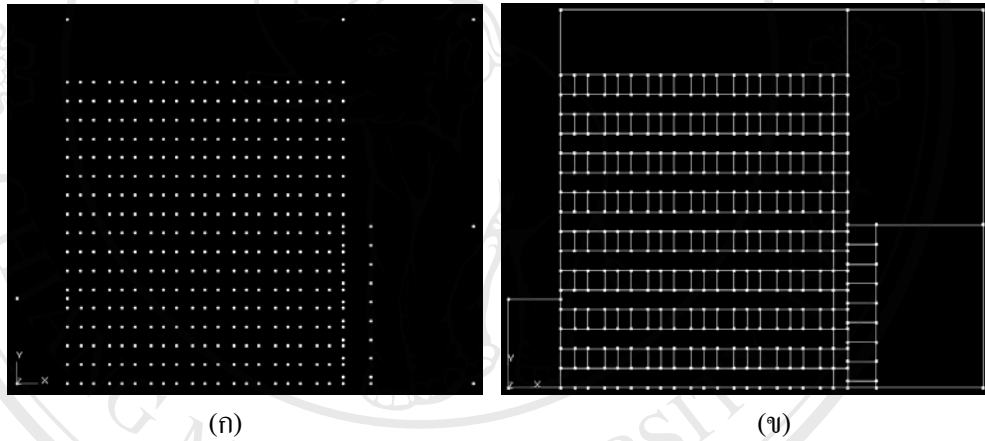
รูปที่ 3.3 แสดงขนาดของห้องเผาอิฐ แบบ 2 มิติ

ในการสร้างแบบจำลองนั้นจะเริ่มสร้างจากโปรแกรม Auto CAD โปรแกรมวาดแบบทั่วไป เพื่อกำหนดขนาดและตำแหน่งที่แน่นอนก่อนนำไปสร้างในโปรแกรม CFD-GEOM จากรูปที่ 3.3 จะเป็นลักษณะของภาพตัด 2 มิติ จะเห็นว่าจะมีส่วนของช่องว่าง และส่วนของบล็อกสี่เหลี่ยมเล็กๆ เรียงกัน โดยที่ส่วนที่เป็นช่องว่างนั้นจะเป็นส่วนที่อากาศสามารถไหลผ่านไปได้ และส่วนที่เป็นสี่เหลี่ยมเล็กๆ นั้นคือ ก้อนอิฐที่วางเรียงกันอยู่ในห้องเผา โดยมีสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ทางด้านขวามือนั้นเป็นแผงกันไฟทำจากอิฐทนไฟมีช่องเป็นรูสามารถให้อากาศไหลผ่านไปได้ ทางเข้า (Inlet) ของอากาศร้อนจะอยู่ทางด้านขวามือด้านล่าง และทางออก (Outlet) จะอยู่ทางด้านซ้ายมือด้านล่าง

เมื่อได้ขนาดที่แน่นอนแล้วจึงทำการวาดลงในโปรแกรม CFD-GEOM โดยเริ่มจากการกำหนดจุด ทำการลากเส้นตามขนาดที่ได้เสร็จเรียบร้อยแล้วทำการกำหนดจุดเพื่อสร้างกริด ความละเอียดของกริดจะเป็นตัวกำหนดจุดในการคำนวณของโปรแกรมต่อไป หากทำการสร้างกริดที่หยาบเกินไปจะทำให้ไม่สามารถทำการคำนวณต่อไปได้ (ไม่ลู่เข้าสู่คำตอบ, Diverge) หรือ หากสร้างกริดที่ละเอียดจนเกินไป ก็จะทำให้เสียเวลาในการคำนวณมากกว่าที่ควรจะเป็นอีกทั้งผลการคำนวณยังได้ค่าที่ถูกต้องเท่ากัน จากการศึกษาถึงการสร้างกริดในงานวิจัยนี้เลือกสร้างกริดแบบ

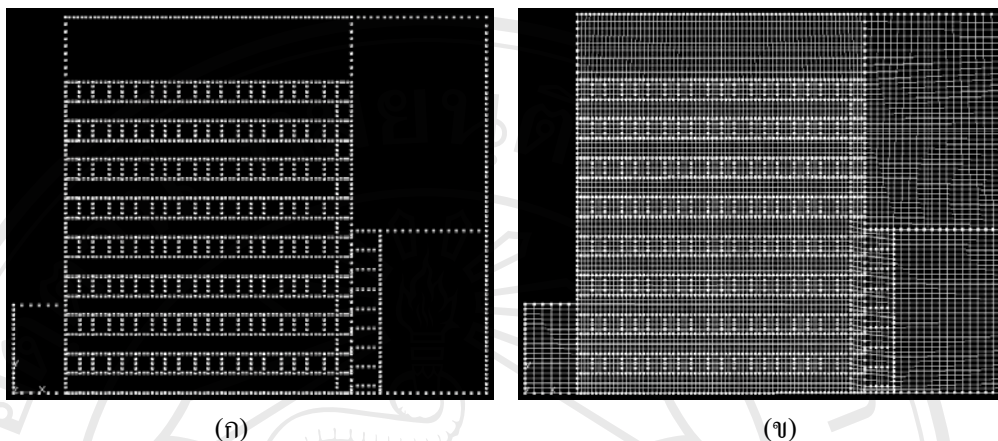
Structured Grid ชนิด H-Grid คือ กริดที่มีลักษณะของเส้น ไม่มีการตัดกันเองแต่จะตัดกับสมาชิกแต่ละตัวของกลุ่มอื่นเพียงหนึ่งครั้ง แต่ละจุดจะมีจุดข้างเคียงทั้งหมด 3 จุด ซึ่งเป็นกริดที่ง่ายต่อการเขียนโปรแกรมในการคำนวณมาก และยังมี Solver ที่มีประสิทธิภาพสูงในการคำนวณอยู่มากความละเอียดของกริดที่ใช้ในการสร้างโมเดลอยู่ที่ประมาณ 2.1-2.5 เซนติเมตรต่อจุดการคำนวณ

วิธีการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม CFD-GEOM จะเริ่มจากการกำหนดจุดขึ้นมาก่อนซึ่งแต่ละจุดนั้นต้องมีพิกัดอ้างอิงที่แน่นอนซึ่งอาจหาได้จากการนำแบบจำลองไปสร้างใน Auto CAD ก่อนเพื่อหาตำแหน่งพิกัดของจุดต่างๆ เมื่อกำหนดจุดได้เรียบร้อยแล้วก็ลากเส้นต่อกันทุกจุดโดยที่แต่ละเส้นที่เกิดขึ้นคือ พื้นผิวของวัตถุซึ่งในโดเมนการคำนวณนี้จะมีอยู่สองพื้นผิวการคำนวณคือ พื้นผิวแรกจะเป็นผนังของเตา และพื้นผิวที่สองเป็นพื้นผิวของก้อนอิฐ (จุดที่อยู่ด้านในห้องเผา)



รูปที่ ๔.๔ แสดงวิธีการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม CFD-GEOM (ก) แสดงการกำหนดจุด (ข) แสดงการต่อเส้นปิด Volume

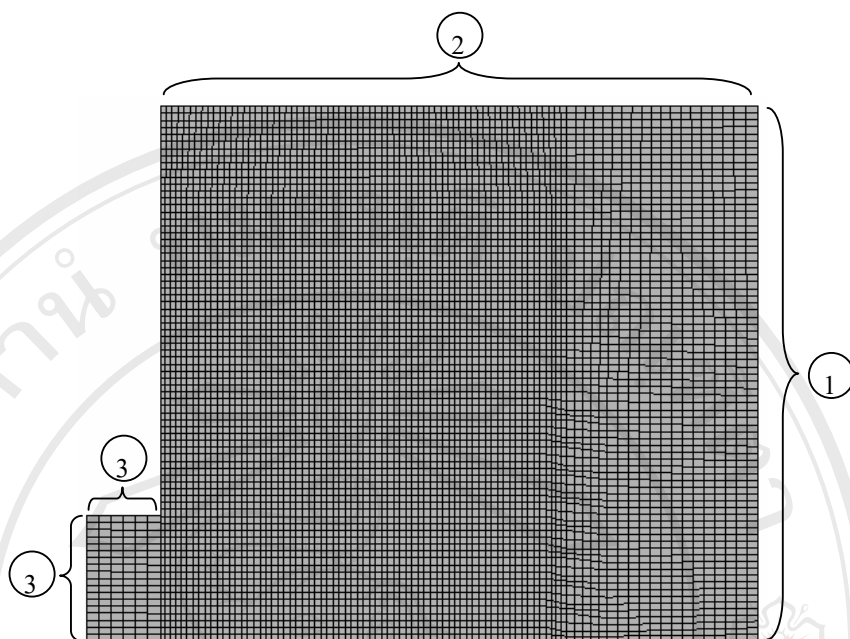
เมื่อทำการลากเส้นต่อจุดที่กำหนดไว้แล้วขั้นตอนต่อไปคือ การกำหนดกริดโดยเริ่มแรกจะกำหนดจำนวนจุดก่อนทำได้โดยการกำหนดแต่ละเส้นที่ต้องการ (รูปที่ ๔.๔ (ก)) บริเวณที่สนใจหรือมีการเปลี่ยนแปลง และซับซ้อนจะต้องมีการกำหนดกริดให้มีความละเอียดมากกว่าบริเวณอื่นที่ไม่สนใจ หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าในการคำนวณมากนักก็อย่างเช่น บริเวณก้อนอิฐและรอบก้อนอิฐจะต้องมีการกำหนดกริดที่ละเอียดกว่าบริเวณอื่นๆ เนื่องจากมีการไหลผ่านของอากาศร้อนในรูปร่างทางเดินที่ซับซ้อนมากกว่าบริเวณอื่นๆ และตรงบริเวณทางเข้าและทางออกจะสังเกตเห็นได้ว่าจะสร้างกริดหยาบกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากลักษณะการไหลของอากาศเป็นการไหลผ่านบริเวณที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 3.5 แสดงวิธีการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม CFD-GEOM (ก) แสดงการกำหนดจุดกริด (ข) แสดงการสร้างพื้นผิวเป็นปริมาตร

ขั้นตอนต่อไปจากการกำหนดจุดที่เส้นแล้ว ทำการสร้างพื้นผิวในโดเมนสองมิติจะได้เป็นปริมาตร (Volume) เลย แต่ต้องทำการเลือกเป็น 2D-Block ด้วยเพื่อกำหนดให้รู้ว่าเป็นปริมาตรในการคำนวณเป็นขั้นตอนสุดท้าย (รูปที่ 3.5 (ข)) แล้วเซฟไฟล์เป็นนามสกุล DTF file (Data Transfer Facility File) ส่วนในรายละเอียดการสร้างนั้นต้องศึกษาจากโปรแกรม CFD-GEOM เมื่อทำการวาดไปหลายๆ ครั้งจะรู้เทคนิคการวาดที่รวดเร็ว และเครื่องมือ (Tool Bar) ลัดต่างๆ ทำให้เราสามารถวาดได้ง่ายขึ้น ส่วนวิธีการสร้างที่กล่าวไปแล้วข้างต้นเป็นหลักในการวาดของโปรแกรมซึ่งเป็นพื้นฐานในการใช้โปรแกรมนี้ เมื่อทำความเข้าใจถึงพื้นฐานในการวาดแล้วก็จะทำให้สามารถประยุกต์ใช้กับรูปร่างอื่นๆ ที่แตกต่างกันออกไป หรือซับซ้อนกว่าได้

ต่อไปเป็นกล่าวกล่าวสรุปอีกครั้งหนึ่งของรายละเอียดของโดเมนซึ่ง รูปที่ 3.6 สามารถแสดงได้ด้วยโปรแกรม CFD-VIEW เป็นการแสดงเส้นตัดของกริดที่ใช้ในการคำนวณตลอดโดเมนแบบ 2 มิติ



รูปที่ ง.6 การสร้างกริดในแบบจำลองเชิงตัวเลข

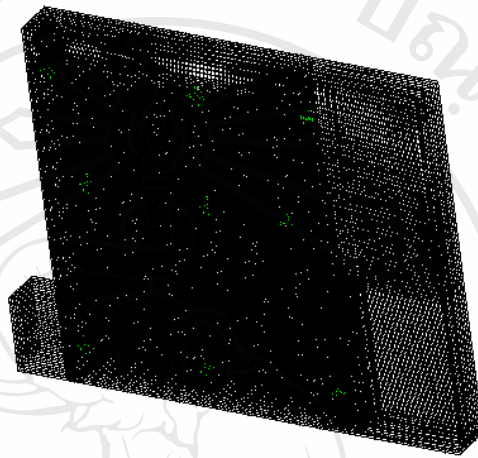
ตารางที่ ง.1 จำนวนกริดที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ด้านที่	จำนวนกริด (ช่อง)
1	73
2	88
3	7
4	19
จำนวนช่องทั้งหมด	6,359

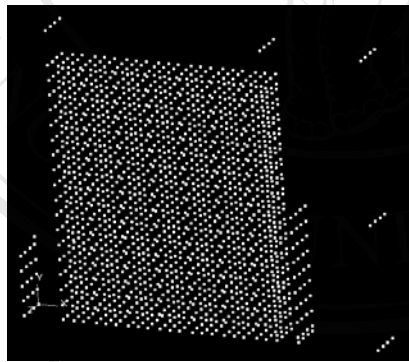
ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่าระยะห่างของช่องหรือจำนวนกริดในแต่ละจุดนั้นจะไม่เท่ากัน ดังเหตุผลที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งการกำหนดกริดในก้อนอิฐนั้นจำเป็นจะต้องสอดคล้องกับบริเวณที่อยู่รอบข้างของก้อนอิฐด้วยเนื่องจากว่าหากกำหนดจุดไม่เท่ากันจะทำให้กริดนั้นไม่สามารถที่จะสร้างพื้นผิวต่อไปได้ หรืออาจทำให้กริดเกิดความซับซ้อนจนโปรแกรมไม่สามารถคำนวณได้ แต่ทั้งนี้การกำหนดกริดนั้นก็ยากที่จะทำความเข้าใจได้ในเรื่องของจำนวนกริดที่เหมาะสม อนึ่งผู้ใช้ต้องมีประสบการณ์ในการแก้ปัญหานั้นๆ หรืออาจเกิดจากการทดลองสร้างก่อนนำไปใช้แก้ปัญหาก็จริง

ในงานวิจัยได้สร้างแบบจำลองทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ ต่อไปจะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งเป็นการศึกษาส่วนสุดท้าย การสร้างแบบจำลองแบบ 3 มิติ นั้นก็สามารถทำได้เช่นเดียวกับ

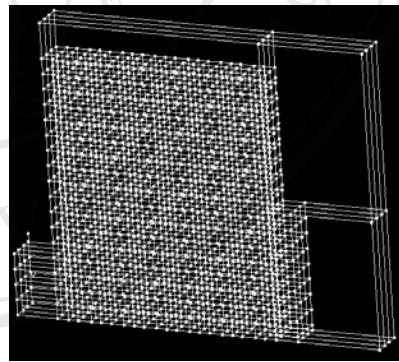
แบบจำลอง 2 มิติ หากแต่มีด้านของความลึกเข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากการสร้างแบบจำลองที่มีลักษณะที่เป็น 3 มิตินั้นในงานวิจัยได้สร้างไว้ 2 แบบ คือ แบบแรกใช้โปรแกรม CFD-GEO โดยวาดความลึกเพียงหนึ่งส่วนเท่านั้นเนื่องจากว่าในแนวทางลิกนั้นมิลักษณะเหมือนที่ซ้ากันตลอดทางด้านลึกเพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณ (Computational Time) โดยมี 8,520 เซล



(ก)



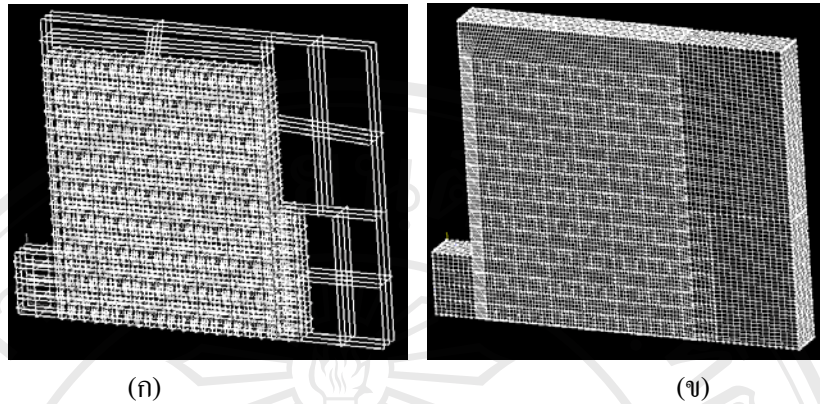
(ข)



(ค)

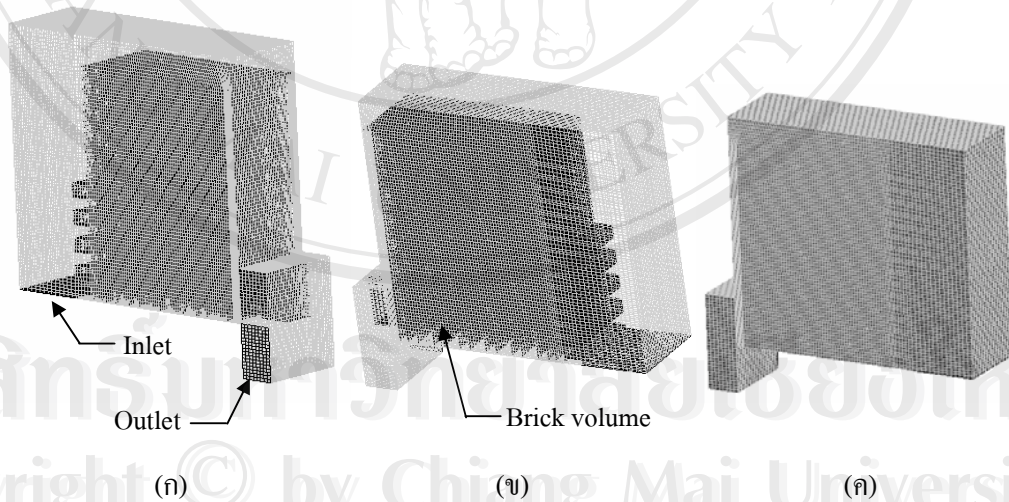
รูปที่ ๗.๗ แสดงวิธีการสร้างแบบจำลองใน โปรแกรม CFD-GEOM แบบ 3 มิติ

(ก) แสดงการกำหนดจุด (ข) แสดงการต่อเส้นปิด Volume



รูปที่ ๘.๘ แสดงวิธีการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม CFD-GEOM แบบ 3 มิติ 1 ส่วน
(ก) แสดงการสร้างโวลุ่ม (ข) กริดสมบูรณ์

แบบที่สองใช้โปรแกรม CFD-GEO โดยวาดความลึกสามส่วน เนื่องจากว่าในแนวทางลึกนั้นมีลักษณะเหมือนที่ซ้ากันตลอดทางด้านลึกเพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณ (Computational Time) วิธีวาดนั้นสามารถ Translate จากแบบ 3 มิติ 1 ส่วนได้



รูปที่ ๘.๙ แสดงวิธีการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม CFD-GEOM แบบ 3 มิติ 3 ส่วน
(ก) รูปด้านหลัง, (ข) รูปด้านหน้า, (ค) รูปด้านนอก

โมเดลทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณตามแบบจำลองที่สร้างไว้ในงานวิจัย ได้กำหนดกรณีศึกษาทั้งหมด 9 โมเดล โดยแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบ 2 มิติ 9 โมเดล และแบบ 3 มิติ 1 โมเดล

ตารางที่ ง.2 แบบจำลองในการคำนวณ

แบบจำลอง (No.)	Temperature T (°C)	Flow Rate Q (kg/hr)
1	800	200
2	800	400
3	800	600
4	900	200
5	900	400
6	900	600
7	1,000	200
8	1,000	400
9	1,000	600

แบบจำลอง 3 มิติ นั้นให้ผลที่ถูกต้องตรงตามความเป็นจริงกว่า 2 มิติ แต่เนื่องจากข้อจำกัดหลายอย่างเช่น ในการคำนวณแบบ 3 มิติ ต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถสูงมากๆ และใช้เวลานานในแต่ละขั้นตอนการทำงาน อีกทั้งยังมีปัญหาอีกหลายอย่างในการใช้โปรแกรมอยู่มาก การคำนวณแบบ 2 มิติ จึงเป็นสิ่งที่เหมาะสมในการศึกษา

ง.1.2 ขั้นตอนการประมวลผล (Processing)

ในการศึกษาไม่ได้สนใจถึงการสูญเสียความร้อนของระบบ จึงกำหนดให้ผนังเป็นฉนวน (Adiabatic Wall) คือ ไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง ได้ทำการศึกษาในส่วนของการไหล (Flow Module) ของอากาศร้อนผ่านก้อนอิฐการกระจายความเร็ว การกระจายอุณหภูมิภายในเตาและการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนสู่ก้อนอิฐ (Heat Module) ที่เวลาใดๆ (Unsteady) ซึ่งในการคำนวณนั้นจะต้องกำหนดคุณสมบัติ (Properties) ของอิฐ คุณสมบัติของอากาศและกำหนดเงื่อนไขที่ขอบ (Boundary Condition) ตรงบริเวณทางเข้าและทางออกของแบบจำลอง

ในการศึกษาได้กำหนดให้ของไหลเป็นอากาศร้อนไหล (Hot Air Flow) ผ่าน ได้ตั้งสมมุติฐานไว้ดังนี้คือ ของไหลนั้นเป็นการไหลสถานะเดียว (Single Phase) และเมื่อกำหนดให้

อากาศเป็นของไหลในการคำนวณ เพราะฉะนั้นการไหลของอากาศเป็นการไหลแบบนิวโทเนียน (Newtonian fluid) เนื่องจากการไหลนั้นเป็นการไหลเข้าไปในห้องซึ่งมีของแข็งปิดล้อมจึงกำหนดให้เป็นการไหลภายใน และการไหลผ่านกองอิฐที่ซับซ้อนในหลายๆ ทิศทางถึงแม้ว่าจะทำแบบจำลองแบบ 2 มิติ แต่เพื่อความถูกต้องจึงกำหนดให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) เป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible Flow) ผนังไม่มีการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอก (Adiabatic) และการไหลเป็นแบบ (No-Slip Wall) ระหว่างของไหลกับผิวของผนังและผิวของก้อนอิฐ

ของไหลต่างๆ ไป เช่น น้ำ อากาศ เป็นของไหลตามแบบของนิวตัน ซึ่งความหมายก็คือ ของไหลที่มีความเค้นเฉือนแปรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้ $\tau \propto \frac{du}{dy}$ จะได้ว่า $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ โดยที่ μ คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute or Dynamic Viscosity) โดยรวมเรียกสมการนี้ว่า กฎความหนืดของนิวตัน (Newton's Law of Viscosity) เพราะฉะนั้นปัญหาในงานวิจัยนั้นเป็นการไหลแบบนิวโทเนียนเนื่องจากกำหนดให้ของไหลเป็นอากาศไหล

ในงานวิจัยได้กำหนดให้อากาศเป็นของไหลที่ไม่ยุบตัวตามความดัน (Compressible Flow) เนื่องจากว่าอากาศจะยุบตัวเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากกว่า 0.3 มัก หรือ 30 % ของความเร็วเสียง (ประมาณ 99 เมตรต่อวินาที)

ง.1.2.1 การกำหนดปัญหา

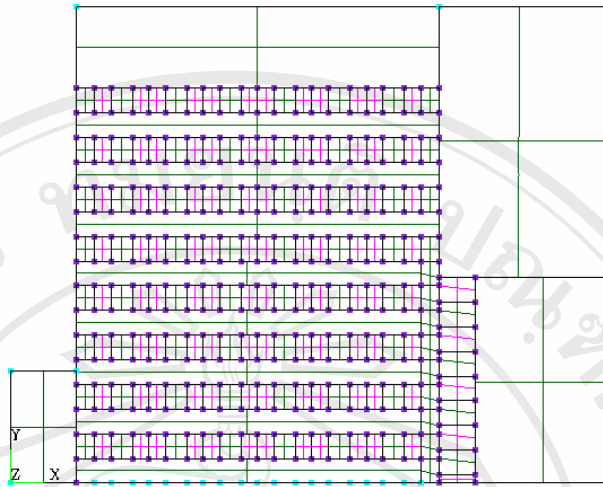
ในโปรแกรม CFDRC[®] จะมีรูปแบบปัญหาให้เลือกใช้มากมาย ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการไหลและการถ่ายเทอุณหภูมิภายในเตาจึงเลือกปัญหาในการคำนวณสองปัญหาคือ ปัญหาการไหลสถานะเดียว และปัญหาทางด้านความร้อน อีกส่วนที่เพิ่มขึ้นมาคือ ได้เลือกใช้ปัญหาการไหลแบบปั่นป่วนรวมด้วยในการสร้างแบบจำลอง จึงทำการเลือกทั้งหมด 3 รูปแบบปัญหา (Specify The Problem Type Settings) คือ การไหล (Flow Module) ความร้อน (Heat Module) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Module) ในการเลือกภายในโปรแกรมทำได้โดยคลิกเลือกที่แท็บแรก PT (Problem Type) แล้วคลิกเลือกโมดูลทั้งสาม เมื่อทำการเลือกแล้วจะมีเครื่องหมายเช็คลูกเกิดขึ้นภายในช่องว่างสี่เหลี่ยมทางด้านขวามือของบรรทัด ในการเลือกนี้เป็นการกำหนดว่าเราจะใช้สมการควบคุม (Governing Equation) ใดบ้างในการคำนวณแก้ปัญหาของเรา ซึ่งรายละเอียดสมการควบคุมและวิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข (Numerical Method) ได้กล่าวไว้โดยละเอียดแล้วในบทที่ 2

ง.1.2.2 การกำหนดโมเดล

การกำหนดรูปแบบโดยรวมของแบบจำลองสามารถกำหนดได้ที่หน้าต่างนี้ เริ่มจากการกำหนดชื่อของแบบจำลองซึ่งจะไปแสดงผลในเอาพุทไฟล์ (Output File) เมื่อทำการรันโปรแกรมเรียบร้อยแล้วในงานวิจัยนี้กำหนดชื่อ KILN MODEL (แบบจำลองเตาเผา) เลือกโคออดิเนต (Coordinate) เป็น Non-Axis Metric เป็นการกำหนดเลือกใช้ระบบพิกัดอ้างอิงแบบ X-Y Coordinate และเพื่อศึกษาถึงผลของเวลา (Time Dependence) ในการถ่ายเทความร้อนได้เลือกการคำนวณเป็นแบบสภาวะไม่คงที่ (Unsteady State) โดยกำหนดระยะเวลาในการคำนวณทั้งหมด 15 ชั่วโมง แบ่งเป็น 30 ครั้ง (No. of Steps) ใช้เวลาครั้งละ (Time Step) 1,800 วินาที หมายถึงทำการคำนวณแล้วแสดงผลออกมาเป็นไฟล์ภายใน 15 ชั่วโมง โดยแสดงทุก 30 นาที เมื่อคำนวณเสร็จแล้วจะได้ไฟล์ทั้งหมดออกมา 31 ไฟล์ รวมทั้งไฟล์เริ่มต้นด้วยโดยชื่อไฟล์ทั้งหมดจะมี .000000 ถึง .00030 ต่อท้ายชื่อที่ได้ตั้งไว้แต่ตอนแรก ในการคำนวณในเทอมที่ขึ้นกับเวลา (Time Accuracy) ใช้วิธีของออยเลอร์ (Euler, Backward) เป็น First Order (1st Order) กำหนดความดันอ้างอิง (Pressure Reference) 10,000 นิวตันต่อตารางเมตร หรือ 1 ความดันบรรยากาศ (1 Bar) หมายความว่าในระบบการคำนวณต่อไปนี้ค่าความดันที่แสดงผลในโปรแกรมจะเป็นความดันเกจคือ ความดันที่ไม่รวมความดันบรรยากาศ เลือกสมการ k-Epsilon ในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน ใส่ค่า Turbulent Prandtl No. เท่ากับ 0.9 ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นของโปรแกรมอยู่แล้ว (Default)

ง.1.2.3 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

การกำหนดคุณสมบัติของของไหลในงานวิจัยได้สมมุติ ให้การเผาไหม้ในเตาเป็นการไหลของอากาศร้อนผ่านกองอิฐต้องกำหนดค่าคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุกับอากาศเพื่อเป็นตัวแปรใช้ในการคำนวณ เมื่อถึงขั้นตอนนี้จะพบว่าเรามีโวลูมในแบบจำลองอยู่ 2 Volume คือ Volume แรกกำหนดเป็นอากาศ (Air Volume) สีเขียว เพื่อศึกษาถึงลักษณะการไหล การกระจายตัวของความเร็วและอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ อีก Volume กำหนดให้เป็นของแข็งก็คือ อิฐ (Brick Volume) สีม่วง เพื่อศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ก้อนอิฐที่เวลาต่างๆ ดังใน รูปที่ ง.10 ส่วนเส้นสีดำที่อยู่รอบนอกสุดกำหนดให้เป็นผนัง (Wall) ที่มีลักษณะเป็นฉนวน



รูปที่ ๓.10 การแบ่ง Volume ในแบบจำลอง (Domain)

การกำหนด Volume ให้เป็นของไหลหรือของแข็งนั้นสามารถทำได้สองวิธีคือ จะกำหนดจากโปรแกรม CFD-GEOM หรือ กำหนดจากโปรแกรม CFD-ACE ก็ได้ เมื่อถึงขั้นนี้ยังสังเกตได้อีกว่าเส้นที่คั่นระหว่าง Volume สอง Volume นั้นหากทำการวาดผิววิธีคือ มีการซ้อน เหลื่อม หรือไม่ต่อกัน เส้นที่คั่นนี้จะไม่เป็นอินเตอร์เฟซ (Interface) และหากไม่เป็นอินเตอร์เฟซจะไม่สามารถทำการคำนวณได้ เมื่อกำหนดเสร็จแล้วกดรันโปรแกรมเครื่องจะฟ้องถึงความผิดพลาดในการลากเส้น ต้องทำการแก้ไขจากโปรแกรม CFD-GEOM ก่อนแล้วเซฟไฟล์เพื่อทำการเปิดใหม่เมื่อไม่มีปัญหาใดแล้วต่อมาทำการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

อากาศร้อน (Hot-Air) ทำการคลิกเลือกทุก Volume แล้วกำหนดคุณสมบัติ (Properties) เป็นของไหล (Fluid) ประเภทก๊าซ (Fluid Subtype) ความหนาแน่น (Density) กำหนดเป็นไอเดิลก๊าซ (Ideal Gas Law) ใส่ค่าน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) เท่ากับ 29 กิโลกรัมต่อกิโลโมล ตั้งชื่อ (Gas Material Name) เป็นอากาศ (Air) เพื่อกำหนดให้ความหนาแน่นแปรผันตามอุณหภูมิเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไหม้มีช่วงกว้างตั้งแต่ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (27 องศาเซลเซียส) ถึง 1,200 องศาเซลเซียส ตามสมการ

$$\rho = \frac{(P + P_{ref})w_m}{RT} \quad (3.1)$$

กำหนดความหนืด (Viscosity, μ) ให้แปรผันตามความหนาแน่นโดยใส่เป็นค่าความหนืดจลน์ (Kinematics Viscosity, ν) $1.589\text{E-}005$ ตารางเมตรต่อวินาที ตามสมการ

$$\mu = \rho \nu \quad (ง.2)$$

ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, C_p) 1007 จูลต่อกิโลกรัมเคลวิน คงที่ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกำหนดเป็นค่าพรันเทิลนัมเบอร์ (Prandtl Number) 0.707 เพื่อให้ค่าการนำความร้อนแปรผันตามค่าความหนืด ตามสมการ

$$k = \frac{\mu C_p}{Pr} \quad (ง.3)$$

สามารถเขียนสรุปความสัมพันธ์ได้ว่า ความหนาแน่น ความหนืด การนำความร้อน แปรผันตามอุณหภูมิ

ก้อนอิฐ (Brick) คลิ๊กเลือกโวลูมอิฐทุกโวลูมกำหนดคุณสมบัติ (Properties) เป็นของแข็ง (Solid) ตั้งชื่อ (Solid Material Name) Brick กำหนดความหนาแน่น (Constant Density) คงที่ $3,010$ กิโลกรัมต่อตารางเมตร เนื่องจากว่าอิฐมีการเปลี่ยนความหนาแน่นไม่มากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป และกำหนดค่าความร้อนจำเพาะให้คงที่ (Specific Heat (Constant), C_p) เท่ากับ 837 J/kg-K ค่าการนำความร้อนคงที่ (Thermal Conductivity (Constant), K) เท่ากับ 2.32 W/m-K ดังตารางที่ ง.3

ตารางที่ ง.3 ตารางแสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์และความร้อนของอิฐ

วัสดุ	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	$\rho (\text{kg} / \text{m}^3)$	$C_p (\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K})$	$k (\text{W} / \text{m} \cdot \text{K})$	$\alpha (\text{m}^2 / \text{s}) \times 10^7$
อิฐ	200	3,010	837	2.32	9.29

ง.1.2.4 การกำหนดเงื่อนไขที่ขอบ (Boundary Condition)

หากทำการวาดแบบได้ถูกต้องพื้นผิวที่ (Surface) เป็นรอยต่อระหว่างสองปริมาตร (Volume) จะถูกกำหนดโดยโปรแกรมอัตโนมัติเป็น อินเทอร์เฟต (Interface) ซึ่งเป็นพื้นผิวที่สามารถส่งค่าการคำนวณผ่านปริมาตรที่ไม่เหมือนกันได้แต่หากทำการวาดแบบไม่ถูกต้องมีการซ้อนทับกันของพื้นผิวโปรแกรมจะไม่สามารถทำการคำนวณได้และจะฟ้องความผิดพลาด (Error) ที่เข้าชุดไฟล์พื้นผิวด้านนอกจะกำหนดเป็นผนัง (Wall) ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อน (Insulation, Subtype:

Adiabatic) ต่อมาทำการกำหนดเงื่อนไขทางเข้า (BC type: Inlet) กำหนดความเร็วทางเข้าโดยเลือกฟังก์ชันอ้างอิง (Flow Subtype: Fix vel. (Cartesian)) ความเร็วทางเข้าจะเข้าตามแกน Y (Y-Direction Velocity: Constant) ในงานวิจัยได้กำหนดขอบเขตการศึกษาโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศในระบบไว้ 3 ค่า คือ 200, 400 และ 600 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แต่เมื่อใส่ค่าในโปรแกรมต้องแปลงเป็นหน่วยเมตรต่อวินาที หรือความเร็ว (Velocity) นั้นเอง และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา 3 ค่า คือ 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส เมื่อได้ค่าต่างๆ แล้วคลิกเลือกที่พื้นผิวกำหนด BC Setting Mode: General และเลือกให้เป็นทางเข้า (BC Type: Inlet) ใส่ค่าความเร็วตามแนวแกน Y (Y-Direction Velocity (Constant): V (m/s)) และอุณหภูมิตรงทางเข้าเป็นอุณหภูมิเผา (Temperature (Profile in Time): T(K)) ตามแบบจำลองที่ต้องการคำนวณในส่วนของการไหลปั่นป่วนนั้นต้องกำหนด 2 ค่า คือ พลังงานจลน์ (Kinetic Energy, $K(m^2/s^2)$) และอัตราส่วนการกระจาย (Dissipation Rate, $D(m^2/s^3)$) ในการทดลองการไหลในอุโมงค์ลมค่าของความเข้มข้นของการไหลปั่นป่วน (intensity turbulence) จะอยู่ประมาณ 1 ถึง 5 % ในงานวิจัยนี้ได้สมมุติค่า 3% (3% Turbulence Intensity) ค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy, K) คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$K = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (จ.4)$$

ตัวอย่างการคำนวณที่ อัตราการไหล 600 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิเผา 800 องศาเซลเซียส ทิศทางความเร็วเข้าทางแกน Y แกนที่เหลือจึงเป็นศูนย์

$$K = \frac{1}{2}((0.03 \times 0)^2 + (0.03 \times 0.3988)^2 + (0.03 \times 0)^2) = 7.156E-005 m^2/s^2 \quad (จ.4a)$$

สามารถหาค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วนที่อุณหภูมิและอัตราการไหลต่างๆ ได้ดังตาราง

ตารางที่ ๔.4 Kinetic Energy ที่อุณหภูมิและอัตราการไหลต่างๆ

Q (kg/h)	T(°C)	K(m ² /s ²)
200	800	7.938E-006
400	900	3.179E-005
600	1000	7.156E-005

ค่าอัตราส่วนการสลายตัวแบบปั่นป่วน (Turbulence Dissipation rate, D) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$D = \frac{\rho C_\mu K^2}{\beta \mu} \quad (3.5)$$

เมื่อค่า $C_\mu = 0.09$ เป็นค่าคงที่, ค่า $\beta = \mu_t / \mu$ คืออัตราส่วนความหนืดปั่นป่วนต่อความหนืดราบเรียบ ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าเท่ากับ 0.2 และค่าความหนาแน่น (Density) คำนวณจากกฎของแก๊ส (Ideal Gas Law, $\rho = P / RT$) ค่าความหนืดคำนวณจาก Sutherland's Law ($\mu = \frac{AT^{1.5}}{(B+T)}$, for Air $A = 1.3605e-06$, and $B = 112$) หรือเราสามารถกำหนดให้โปรแกรมคำนวณค่าเหล่านี้ให้ได้โดยในช่อง อัตราส่วนการสลายตัวแบบปั่นป่วน (Turbulence Dissipation rate, D) กำหนดเป็น Length Scale หรือ Hydraulic Diameter แล้วใส่ค่า โดยที่ Length Scale มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของ Hydraulic Diameter โปรแกรมสามารถทำการคำนวณค่าอัตราส่วนการสลายตัวแบบปั่นป่วนให้เราได้เช่นกัน ส่วนทางออก (BC type: Outlet) ไม่ต้องกำหนดค่าให้เป็นค่าเริ่มต้นของโปรแกรม (Fixed Pressure: $P=0$ $T=300$) หมายความว่าค่าที่ออกมาจากการคำนวณจะคำนวณต่อๆ กันมาโดยที่ทางออกจะเหมือนออกสู่บรรยากาศ (ความดันออกสู่บรรยากาศไม่ได้เท่ากับศูนย์ที่ทางออก)

3.1.2.5 การกำหนดค่าเริ่มต้น (Initial Condition)

เพื่อป้องกันการลู่ออกในช่วงแรกของการคำนวณ ควรกำหนดค่าเริ่มต้นในการคำนวณไว้ หรือ อาจกำหนดเพื่อต้องการให้คำนวณต่อจากผลลัพธ์เดิมได้ ในงานวิจัยนี้ได้เริ่มการคำนวณไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในขั้นกระบวนการของการเผาจึงต้องกำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้น 313 องศาเซลวิน และค่าความเร็วเท่ากับค่าความเร็วเข้าของแต่ละแบบจำลอง ส่วนค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy, K) ค่าอัตราส่วนการสลายตัวแบบปั่นป่วน (Turbulence Dissipation Rate, D) นั้นกำหนดเหมือนเดิมในตอนแรก (Inlet)

3.1.2.6 การกำหนดวิธีการแก้ปัญหา

กำหนดรอบการคำนวณ 1,000 รอบ (Max. Iterations: 1000) เพื่อให้แน่ใจว่ากราฟการคำนวณนั้นลู่เข้าสู่คำตอบจริงไม่มีลักษณะลู่เข้าเป็นช่วงๆ กำหนดหยุดการคำนวณไว้ที่ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Convergence Crit.: 0.0001) การคำนวณค่าความเร็ว (Velocity) ความหนาแน่น (Density) เอน

ทาลปี (Enthalpy) การปั่นป่วน (Turbulence) กำหนดเป็นการคำนวณแบบอัปวินด์ (Spatial Differencing: Upwind) เลือก Solvers เป็น CGS-Pre Sweeps 50, Criterion 0.0001 และค่า Inertial Relaxation นั้นเป็นการกำหนดค่าที่ยากที่สุดเนื่องจากต้องกำหนดจากประสบการณ์หรือทดลอง กำหนดเองโดยต้องทำความเข้าใจระบบการคำนวณของ CFD ซึ่งทฤษฎีโดยละเอียดได้กล่าวไปแล้ว ในบทที่ 2

ง.1.2.7 การกำหนดการรันโปรแกรม

ในขั้นนี้ส่วนมากเป็นค่าเริ่มต้นของโปรแกรมแต่เอาพุตไฟล์ (Output File) เราสามารถเลือกตามค่าที่เราสนใจพิจารณาในการคำนวณได้แต่ควรเลือกค่าสรุปพลักซ์ของมวล (Mass Flux Summary) ด้วยเพื่อตรวจสอบว่าการคำนวณเป็นไปตามสมการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) หรือไม่ แต่โดยทั่วไปหากทำการคำนวณแล้วผลคำตอบเข้าสู่ค่าตอบกฎข้อนี้จะต้อง แต่จะมีประโยชน์เมื่อผลการคำนวณนั้นเกิดการแกว่งของค่าซึ่งทำให้ไม่แน่ใจว่าผลการคำนวณนั้นถูกต้องหรือไม่ จึงทำการดูได้จากค่านี้ เมื่อกำหนดค่าต่างๆ เสร็จสิ้นแล้ว กดรันโปรแกรม (Submit to Solver) โดยสามารถเลือกได้อีก 2 แบบ คือ รันแบบ Save ทับไฟล์เดิม (Submit Job Under Current Name) หรือรันเป็นไฟล์ใหม่

สรุปขั้นตอนการกำหนดตัวแปรต่างๆ (Quick Start Instructions)

1. Specify the Problem Type Settings.
 - PT --> Modules--> Activate Flow, Heat Transfer, Turbulence
2. Specify the Model Options.
 - MO --> Change title to "Kiln Brick"
 - MO --> Shared -->
 - ☐ Polar: Non Axisymmetric
 - ☐ Time Dependence: Transient
 - ☐ Number of steps: 30
 - ☐ Time step: 1800 s
 - ☐ Time Accuracy: Euler (1st Order)
 - MO --> Turb.
 - ☐ Turbulence model: K Epsilon

3. Specify the Volume Condition Properties.

- VC --> Fluid properties:
 - ☐ Density Ideal gas Molecular wt. 29 kg/kgmol
 - ☐ Viscosity (Constant kinematic) ν 1.589E-005 kg/m-s
 - ☐ Specific Heat (Constant) C_p 1007 J/kg-K
 - ☐ Thermal Conductivity (Prandtl Number) Pr 0.707 W/m-K
- VC --> Solid properties:
 - ☐ Density (Constant) ρ 3010 kg/m³
 - ☐ Specific Heat (Constant) C_p 837 J/kg-K
 - ☐ Thermal Conductivity (Constant) K 2.32 W/m-K

3. Specify the Boundary Condition Values.

- BC --> Inlet
 - ☐ Flow $V = 0.3988$ m/s Temperature (profile in time)
 - ☐ Turb. Kinetic Energy (Constant) $7.156E-005$ m²/s²
 - ☐ Hydraulic diameter 0.59 m
- BC --> Outlet
 - ☐ Flow Fixed Pressure $P=0$ $T=300$
 - ☐ Turb Kinetic Energy (Constant) 0 m²/s²
 - ☐ Hydraulic diameter 0 m

5. Specify the Initial Condition Settings.

- IC --> Initial Conditions: For All Volumes
 - ☐ IC Sources: Constant
 - ☐ Flow $U=0$ $V=0.3988$ $P=0$ $T=313$
 - ☐ Turb. $K=7.156E-005$ m²/s² $H_d=0.59$ m

6. Specify the Solver Control Settings.

- SC --> Shared
 - ☐ Max. Iterations = 1000
 - ☐ Convergence criteria = 0.0001

7. Specify the Output Options.

- Out --> Print --> Mass Flux Summary

8. Run the Simulation.

- Run --> Submit to Solver --> Submit Job Under Current Name

9. Post Processing the Simulation.

- CFD-VIEW can be used to post-process the solution

ง.1.3 ขั้นตอนหลังการประมวลผล (Post-Processing)

เมื่อกำหนดค่าต่างๆ ลงในโปรแกรม CFD-ACE แล้วตามขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าต่างๆ ตามที่เราได้เลือกไว้ ในการแก้ระบบสมการพีชคณิตขนาดใหญ่ ตามวิธีการที่ได้กล่าวไว้โดยละเอียดในบทที่ 2 ระยะเวลา (Computational Time) ในการคำนวณนั้น ขึ้นอยู่กับรูปร่างปัญหาที่ได้ทำการศึกษาและมิติในการคำนวณนั้นหมายถึงขนาดเมทริกซ์ที่เปลี่ยนไปด้วยในงานวิจัยได้สร้างทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ พบว่าแบบจำลองที่สร้างแบบ 2 มิติ นั้นใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 30-35 นาที ต่อหนึ่งแบบจำลอง แต่หากเป็นแบบ 3 มิติ นั้นจะต้องใช้เวลาถึงประมาณ 3-4 วัน ต่อหนึ่งแบบจำลอง ทั้งนี้ขึ้นกับความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วย นั่นเป็นเหตุผลประการหนึ่งที่เลือกทำการคำนวณแบบ 2 มิติ ก่อนเพื่อให้ได้ทราบถึงแนวโน้มก่อนนำไปคำนวณในแบบ 3 มิติ เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ และยังลดข้อผิดพลาดจากการกำหนดค่าด้วย

โปรแกรม CFD-VIEW เป็นอีกหนึ่งโปรแกรมในโปรแกรมชุดของ CFDRC[®] เองใช้ในการแสดงผลการคำนวณเป็นภาพกราฟฟิกส์ หรือข้อมูลเชิงตัวเลขได้ในโปรแกรมเดียวกัน วิธีการใช้โดยละเอียดสามารถอ่านได้จากคู่มือเรียนรู้ (Tutorial) ของโปรแกรม CFDRC[®] เองและผลของการคำนวณทั้งหมดจะแสดงไว้ในบทที่ 4



ภาคผนวก จ
บทความตีพิมพ์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



ANSCSE10
10th Annual National Symposium on
Computational Science and Engineering

March 22-24, 2006
Faculty of Science, Chiang Mai University
Chiang Mai, Thailand



ลิขสิทธิ์ในนามของเชียงใหม่
 Copyright © by Chiang Mai University
 All rights reserved

ISBN: 974-686-924-4

Simulation of Hot Air Flow in Brick Kiln Using Computational Fluid Dynamics.

Pisit nakpasert and Det Damrongsak

Department of Energy Engineering Faculty of Engineering and Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, E-mail: detdd@yahoo.com,
Chiangmai University, Chiangmai 50200, Thailand.

Abstract

This paper is to investigate the motion and temperature of the hot air stream inside a brick kiln using computational fluid dynamics (CFD). The kiln with a pile of curing bricks is constructed in two and three-dimensional model. The two-dimensional model study the velocity and temperature distribution inside the brick kiln for analyzing to influence of flow rate and temperature, which are significant parameters in brick curing process, study to three values of air flow rates i.e. 200, 400 and 600 kg_{air}/hr along with three values of temperature i.e. 800, 900 and 1,000 °C. The three-dimensional model is use to study to the flow phenomenon in the curing room. The results show that the high hot air temperature and flow rate reduce the brick curing time, which results in the more energy saving.

1. Introduction

Thailand's brick industries use low cost and production knowledge but large industries take more investment in production and processional knowledge that make higher processional performance and less energy consumption when compare with small brick industries. Industries that have more waste energy effect to total country's resource and expand to anyway.

Curing heat are taken away to high temperature atmosphere, that create "heat recovery" concept by building four parts kiln for taking heat to worthwhile using. This research is study to flowing characteristic parts of hot air through bricks for finding the best temperature distribution by building studied model to save cost and time in real experiment from computational fluid dynamics.

2. Principle of Brick kiln

Brick kiln's initial principle bring outside air into cooling room for reducing temperature of brick, then the air that passed this room get higher temperature from hot brick and flow to other one rooms for curing by going through firing way to make higher temperature for combustion, then hot air flow out of firing room to preheating drying room for making bricks slightly dry respectively. Air temperature from preheating room is high temperature, after that the air pass to drying room for draining water. When air temperature pass each room, slightly down and flow out to exhaust to outside atmosphere, use suction fan to control the air.

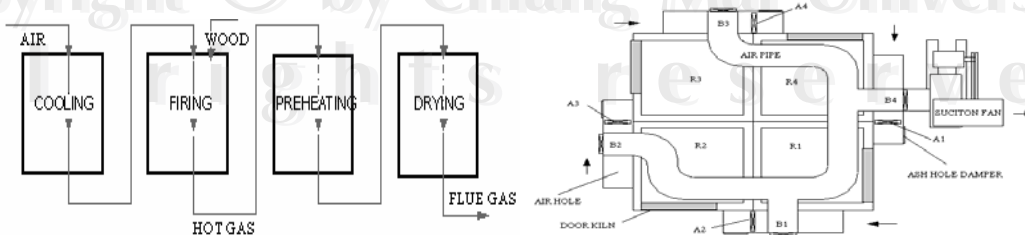


Figure.1. A four-chamber type Brick kiln for this research

The air from latest drying room get lower temperature because it's flow from preheating and drying room already, that can be recover heat for useful. Direction of

wind are controlled by damper that place between junction way and air duct of each rooms.

3. Math modeling

3.1 Principle and theory of CFDRC®

Solving of flowing problem consist of three component as partial differential equation boundary conditions and geometry of problem. In addition, solving of flowing related differential equation system consist of conservation of mass, conservation of momentum equation and conservation of energy which these equation systems describe to actually flow. These equations contain to parameter that is derivative from, total equations called governing equation.

3.1.1 Conservation of mass Equation

As first order differential equation that can explain to existing of mass consist of three parameter (ρ, u, v) or called continuity equation which these parameters change all of flowing domain, can be define as

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] = 0 \quad (1)$$

Can be write in vector form as

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot \rho \bar{V} = 0 \quad (2)$$

3.1.2 Conservation of momentum Equation

This equation is derive from Newton's second Law with relationship between mass and acceleration

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{V} u) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \bar{\nabla} \cdot (\mu \bar{\nabla} u) + \rho f_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{V} v) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \bar{\nabla} \cdot (\mu \bar{\nabla} v) + \rho f_y \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{V} w) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \bar{\nabla} \cdot (\mu \bar{\nabla} w) + \rho f_z \quad (5)$$

3.1.3 Conservation of energy Equation

This equation is derive from first law of thermodynamic state that rate of change of energy inside fluid element equal with Net flux of heat into element plus rate of work done on element due to body and surface forces

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \bar{\nabla} \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \bar{V} \right] &= \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} + \frac{\partial(u \sigma_x)}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \sigma_y)}{\partial y} + \rho \bar{f} \cdot \bar{V} \end{aligned} \quad (6)$$

When u is partial velocity in x-axis, (m/s), v is partial velocity in y-axis, (m/s)

w is partial velocity in z-axis, (m/s), ρ is Density of fluid, (kg/m³)

f is gravity, (m/s³), $\bar{\nabla} \equiv \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k}$ and $\bar{V} = (u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k})$

In this case assume that perfect gas

$$p = \rho RT \quad (7)$$

When R is Universal gas constant.

3.2 Modeling

Generating of math modeling by using computational fluid dynamics program begin of making domain for computation. In this research make domain that feature

assembly with kiln, especially interested are that simulate curing room, similarly dimension with real kiln, this research choose model two and three-dimensional.

The model is wrote on CFD-GEOM program by assigning points, them make lines follow assigned sizes, then set points for making grids, surface and volume. Points in computational program are assigned by delicateness of grid.

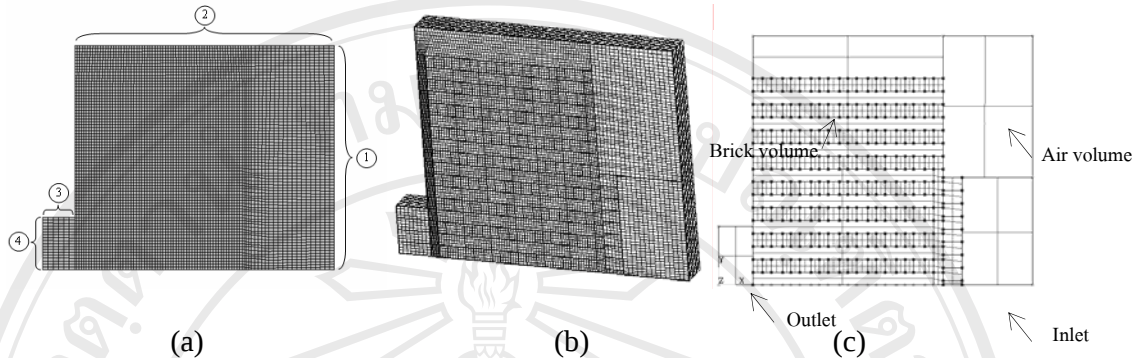


Figure.2. Modeling (a) Generating grids for two-dimensional model (b) Generating grids for three-dimensional model (c) Specifying volume math modeling 2 and 3-dimensional.

Table 3.1 Number of grid are used in model

Side	Number of grid (square)	Side	Number of grid (square)
1	74	3	7
2	88	4	19

In three-dimensional model for saving computational time, making model one column of deep because of all of deep set the same form

3.3 Boundary Condition

Computation need to assign boundary condition for computational initial condition, this research assign initial condition by setting inlet temperature from real data ten times, then take it to be average data (figure 5) experimental graph burn to temperature of 900°C, This research change curing method three types by curing at temperature of 800, 900 and 1,000°C , setting computational hypothesis by assigning working fluid is hot air flow through bricks is one phase fluid, transient computation, ideal gas property, initial temperature of 35°C , atmosphere pressure of 1 atm., use K- ϵ Model equation for solving turbulence flowing problem, adiabatic wall, no-slip wall, assign inlet velocity 3 values as 0.2658, 0.3988 and 1.329 m/s kinetic energy of 7.948E-006, 3.179E-005 and 7.156E-005 m²/s²

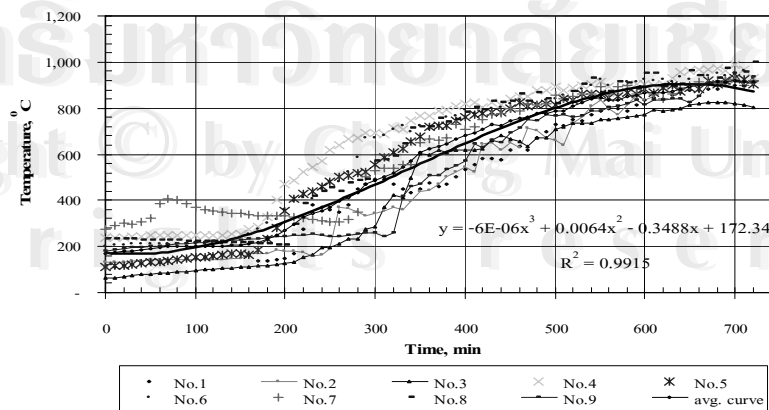


Figure.3. Controlling temperature in Brick Kiln

4. Result

4.1 Flow appearance inside the brick kiln.

The velocity distribution is compared with all simulation. It can be find that the velocity distribution in the kiln is related with flow rate in the same way the flow rate is high, the velocity distribution in all parts of the kiln is also high and the temperature is related with the velocity distribution in the same way too. Similarly, if the temperature is high, the velocity distribution in all parts of the kiln is high too but it has little effect if it is compared with effect of flow rate.

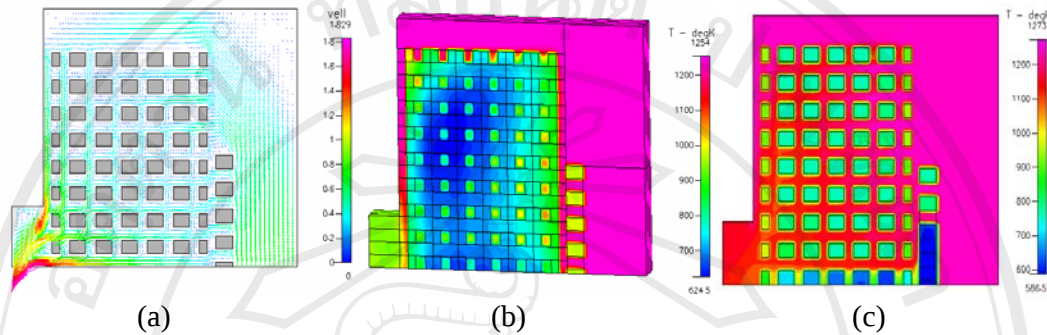


Figure.4. Model at flow rate 600 kg/hr and 1,000°C of combustion temperature (a) Two-dimensional model at time 30 minute. (b) Three-dimensional at time 7 hours. (c) Two-dimensional model at time 10 hours.

From figure 4(b),(c). It can be find that lowest temperature zone is the bottom of brick pile. This result is corresponding with experimental data because of the difference of temperature between top and bottom of brick pile is very different so that the energy consumption in curing brick is high, due to the brick top and middle of brick pile can be finish but it can't be finish at the bottom of brick pile then this kiln will be operated to the temperature at bottom of brick pile finish.

4.2 Validation

For the correction of created simulation, it is investigated to compare the result of this simulation. The experimental data is compared with real temperature at 2 positions, which are top-middle and center of brick pile.

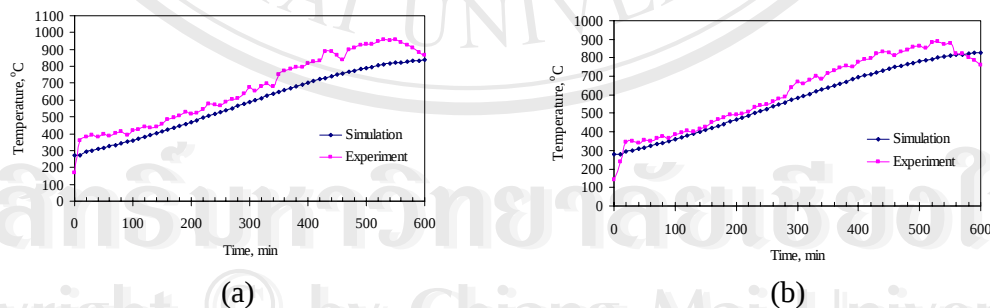


Figure.5. Graph is expressed in comparing between simulation and experimental result (a) in top-middle of brick pile, (b) in center of brick pile.

Form figure 5 (a) top-middle zone of is error from experiment is 15.4 percent this error is occurred from instrument and measuring position. Form figure 5 (b) center zone of is error from experiment is 9.5 percent. These errors are occurred from instrument and measuring position. Because the limit of measuring instrument is that can't measure in the middle of brick pile and being simulate in two-dimension, in this calculation, the effect of flow rate and temperature can make different flow rate from real simulation at three-dimensions the assumed to be one phase hot air that is different from fluid in experiment which is mixed fluid with water and air. Second, the velocity is defined in uniform flow around inlet zone but from result of experiment, the hot air is

flowed in un-uniform flow because of air flow is flowed across wood pile that is varies in thickness.

4.3 Effect of airflow rate and combustion temperature

In this research, it is investigated in effect of three flow rate value. Which is varied in 200, 400 and 600 kg/h and the temperature of combustion is varied in 800, 900 and 1,000°C. 9 simulation is created to find the minimum of curing time and the best temperature distribution from figure 6 is be find that the simulation that has 600 kg/hr of flow rate and 1000°C of combustion temperature, can express the minimum of curing time which is 378 minute or 6 hour with 18 minute. The second minimum is the simulation, which has 600 kg/hr of flow rate and 900°C of combustion temperature. The curing time of this simulation is 382 minute or 6 hour with 22 minute. These simulations use less curing time than original curing brick process. This uses average curing time in 10 hour. The best simulation is used curing time in 3 hour with 38 minute then it can be reduce energy consumption and increase productivity in curing brick proceed.

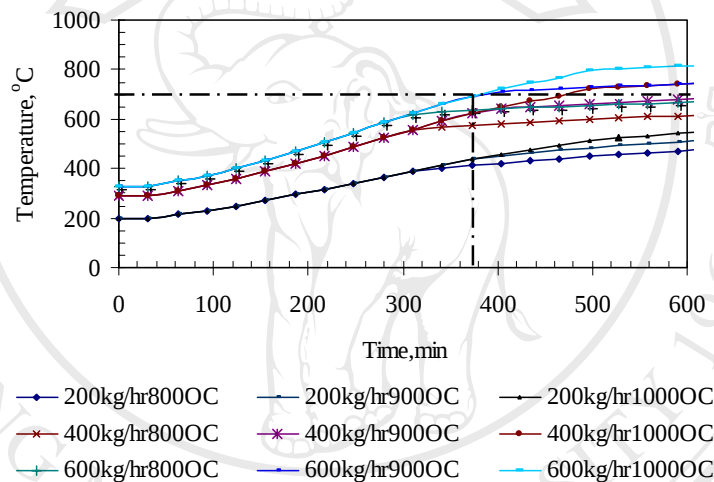
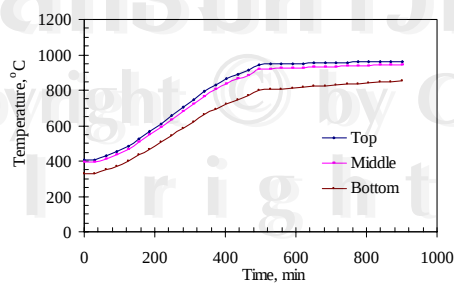
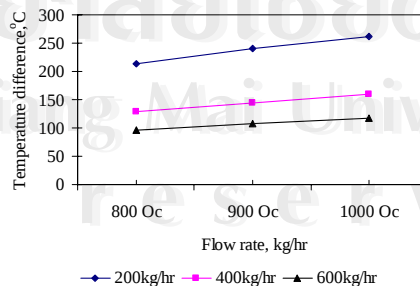


Figure.6. Is expressed in comparing in varied condition (varied flow rate and varied temperature), 9 simulations.

From figure 6, it can express in effect of flow rate changing which has more effect with curing time than combustion temperature. When calculation of simulation is used minimum curing time, it is considered in temperature distribution inside the brick kiln between top and bottom of brick pile which is the main problem of this kiln.



(a)



(b)

Figure.7. (a) is expressed in difference of temperature at 3 positions (top, middle and bottom of brick pile) in the condition that has 600 kg/hr of flow rate and 1,000°C of combustion temperature. (b) Is expressed in difference of temperature between top and bottom of brick pile, 9 simulations.

From figure 7 (a), it can express in difference of temperature between top, middle and bottom of brick pile. This simulation which has 600 kg/hr of flow rate and 1,000°C of combustion temperature has few difference between top zone and middle zone of this brick pile but the temperature between top zone and bottom zone is different in 117.56°C of average value. Next, it is investigated in average different temperature of entire process in all of simulation. From figure 7 (b), it can be found that the simulation which has 600 kg/hr of flow rate and 800°C of combustion temperature is least difference between top and bottom-middle zone which is 96.16°C of average value because of flow rate and temperature are practical. If the flow rate is high, the temperature difference is low, if the combustion temperature is high, the temperature difference is high and then the effect of flow rate has more correlation with temperature distribution than combustion temperature.

5. Conclusion

The simulation of hot air flow in brick kiln using Computational Fluid Dynamics shows that the temperature distribution inside the brick kiln is correlated with flow characteristic inside the brick kiln. The temperature is high in the zone that has high flow rate of hot air. On the other hand, the temperature is lower in the zone that has lower flow rate of hot air. Inside the brick kiln the hot air flows from right to left and top to bottom. The temperature distribution inside the brick kiln flows from outside to inside and top to the bottom of brick pile. The bottom of the brick pile zone has the lowest temperature.

In addition, the brick curing time is shorter as a result of high combustion temperature and flow rate of hot air. And the temperature difference between the top and bottom of brick pile become smaller when the combustion temperature is low and the hot air flow rate is high.

Therefore, the computational fluid dynamics can be used to estimate the curing time and temperature distribution inside the brick kiln.

6. References

- [1] Pramote dechaumphai. Finite Element Method for Computational Fluid Dynamics. Department of Mechanical Engineering, faculty of engineering Chulalongkorn University, Chulalongkorn book, Bangkok, Thailand 90110, 2545.
- [2] B.E.Lauder, D.B. Spalding.,(1974). "The numerical computation of turbulent flows", Methods Appl. Mech Eng.
- [3] Anderson, John David (1995). Computational fluid dynamics: the basics with applications. New York, McGraw-Hill
- [4] S.Prasertsan, Theppaya, G. Prateechaikul and P. Kirirat. Development of an enegy-efficient brick kiln. Department of Mechanical Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Thailand 90110



การประชุมวิชาการ
การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ต้านความร้อน
ครั้งที่ 5

6 - 7 เมษายน 2549

ณ โรงแรมโลตัส ปางสวนแก้ว จังหวัดเชียงใหม่

ลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright © by Chiang Mai University
 A I

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การจำลองการไหลของอากาศร้อนในเตาเผาอิฐโดยการเปลี่ยนตำแหน่งช่องทางออกก๊าซร้อน

Simulation of Hot Air Flow in Brick Kiln by Varying Hot Gas Outlet Position.

พิศิษฐ์ นาคประเสริฐ

เดช ดำรงศักดิ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

จ. เชียงใหม่ 50200

โทรศัพท์ 053-944146

โทรสาร 053-944145

E-mail: G4726055@nthai.com

E-mail: det@dome.eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงอิทธิพลของตำแหน่งช่องทางออกก๊าซร้อนที่มีผลต่อการกระจายความร้อนภายในห้องเผาอิฐเพื่อพัฒนาเตาเผาอิฐแบบสี่ห้องเผาให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขในด้านพลศาสตร์ของไหล เพื่อหาผลเฉลยของสมการควบคุมให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย แบบจำลองสร้างโดยเปลี่ยนตำแหน่งช่องทางออกก๊าซร้อน จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่มีช่องทางออกก๊าซร้อนบริเวณตรงกลางด้านล่าง มีการกระจายตัวของอุณหภูมิในกองอิฐดีที่สุด

Abstract

This research is to study the effect of a hot gas outlet position and to investigate the best thermal distribution inside the brick kiln for developing efficiency of four chambers brick kiln by creating a numerical model, which is used in fluid dynamic, to solve the partial differential equations. The numerical model is created by changing the position of the hot gas outlet. It can be found that the model, that has the hot gas outlet position at the bottom center of the brick kiln has the best temperature distribution over the brick pile.

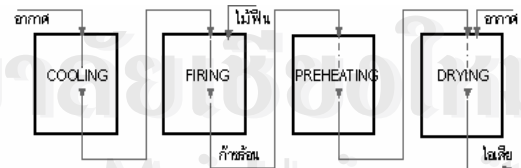
1. บทนำ

อุตสาหกรรมผลิตอิฐในประเทศไทยนั้นมีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง และมีการขยายตัวตามสถานะเศรษฐกิจของประเทศ อุตสาหกรรมผลิตอิฐนั้นมีหลายขนาดทั้งขนาดใหญ่ กลางและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ที่กระทำการในครอบครัว ซึ่งมีการลงทุนไม่มาก และใช้ความรู้ในการผลิตน้อย ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการลงทุนในการผลิตสูง และใช้ความรู้ในการผลิตสูง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตนั้นสูง การสิ้นเปลืองพลังงานนั้นจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการผลิตอิฐในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก จึงทำให้อุตสาหกรรมผลิตอิฐขนาดเล็กมีต้นทุนในการผลิตสูงตามไปด้วย ในการผลิตอุตสาหกรรมที่มีการสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์มาก จะส่งผลกระทบต่อทรัพยากรประเทศโดยรวมและขยายวงกว้างไปในด้านต่างๆ ซึ่งส่งผลเสียโดยรวมต่อประเทศ

ความร้อนจากการเผาไหม้ถูกทิ้งออกสู่บรรยากาศที่อุณหภูมิสูง จึงเกิดแนวคิดการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (Heat recovery) โดยสร้างห้องเผาที่มีทางต่อเชื่อมทั้ง 4 ห้อง เพื่อนำความร้อนไปใช้ได้อย่างคุ้มค่า ในการศึกษาเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของเตาชนิดนี้ได้ศึกษาในส่วนของลักษณะการไหลของอากาศร้อนผ่านกองอิฐภายในห้องเผาอิฐหาการกระจายตัวของอากาศร้อนที่ดีที่สุด โดยการสร้างแบบจำลองในการศึกษาเพื่อประหยัดเงินและเวลาในการทดลองจริง โดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

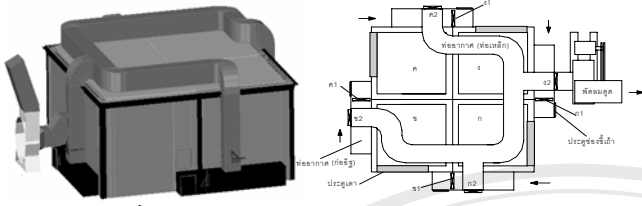
2. หลักการทำงานของเตาเผาอิฐ

หลักการทำงานของเตาเริ่มจากนำอากาศภายนอกเข้าห้องที่เผาเสร็จเป็นการลดอุณหภูมิของอิฐแล้วอากาศส่วนนี้ที่ผ่านเมื่อได้รับความร้อนจากอิฐก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นแล้วไหลสู่อีกห้องเพื่อทำการเผาโดยผ่านเข้าทางช่องพินเพื่อช่วยในการสันดาปให้อุณหภูมิสูงขึ้น ก๊าซร้อนที่ไหลออกจากห้องเผาจะถูกส่งต่อไปที่ห้องอุ่นอิฐซึ่งจะทำให้อิฐมีอุณหภูมิสูงขึ้น อุณหภูมิอากาศที่ส่งมาจากห้องเผานี้จะมีอุณหภูมิสูง จากนั้นอากาศก็จะวิ่งต่อไปที่ห้องอบอิฐเพื่อทำการไล่ไอน้ำ อุณหภูมิของอากาศเมื่อผ่านแต่ละห้องจะต่ำลงแล้วอากาศจะไหลออกทางปล่องทิ้งออกสู่บรรยากาศภายนอก การบังคับอากาศทำได้โดยพัดลมดูดอากาศ



รูปที่ 1 หลักการทำงานของเตาเผาอิฐ

ก๊าซที่ออกจากห้องอุ่นอิฐห้องสุดท้ายนี้จะมีอุณหภูมิต่ำมาก เนื่องจากไหลผ่านมาจากห้องอุ่นและอบอิฐก่อนแล้ว ทำให้มีการใช้ความร้อนได้อย่างคุ้มค่าก่อนถูกทิ้งออกไปได้อีก 2 กระบวนการ การควบคุมลมนั้นควบคุมได้โดยประตูกันลม (Damper) ที่อยู่ระหว่างทางเชื่อมของแต่ละห้องและท่ออากาศที่ต่อออกจากทางเชื่อม



รูปที่ 2 เตาเผาอิฐแบบ 4 ห้องเผา ที่ใช้ในงานวิจัย

3. แบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Model)

3.1 หลักการและทฤษฎีของการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวกับการไหลโดยปกติจะมองหาคำตอบหลัก 3 ประการ คือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา และรูปร่างลักษณะของปัญหา ซึ่งในการแก้ปัญหาเรื่องการไหลระบบสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องคือ สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งระบบสมการข้อนี้อธิบายถึงความเป็นจริงของการไหล สมการเหล่านี้จะประกอบไปด้วยพจน์ที่อยู่ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์ (Derivative) สมการในการแก้ปัญหาทั้งหมดรวมเรียกว่าระบบสมการควบคุม (Governing Equation)

3.1.1 สมการเชิงอนุพันธ์มวล (Conservation of Mass)

เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่อธิบายการไม่สูญหายของมวล ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรทั้งหมด 3 ตัว (ρ, u, v) หรือเรียกอีกชื่อว่า สมการความต่อเนื่อง (Continuity) โดยที่ตัวแปรเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปได้ตลอดโดเมนของการไหลซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] = 0 \quad (1)$$

สามารถเขียนในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (2)$$

3.1.2 สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม (Conservation of momentum

Equation)

ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's second Law) ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับความเร่ง

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} u) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + \rho f_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} v) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + \rho f_y \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} w) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + \rho f_z \quad (5)$$

3.1.3 สมการเชิงอนุพันธ์พลังงาน (Conservation of Energy)

สมการนี้ประดิษฐ์มาจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ที่กล่าวว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลจะเท่ากับปริมาณพลักความร้อนที่ให้แก่มวลบวกกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่างๆ ที่กระทำบนก้อนมวลนั้น

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right] = \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} + \frac{\partial(u \sigma_x)}{\partial x}$$

$$+ \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \sigma_y)}{\partial y} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \quad (6)$$

เมื่อ u คือ ความเร็วย่อยในแนวแกน x, (m/s)

v คือ ความเร็วย่อยในแนวแกน y, (m/s)

w คือ ความเร็วย่อยในแนวแกน z, (m/s)

ρ คือ ความหนาแน่น (Density), (kg/m³)

f คือ ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก, (m/s²)

$$\text{และ } \nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k} \quad (7)$$

$$\vec{V} = (u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}) \quad (8)$$

ในกรณีนี้กำหนดให้ก๊าซเป็นก๊าซสมบูรณ์ (Perfect gas)

$$p = \rho R T \quad (9)$$

เมื่อ R คือ ค่าคงตัวสากลของก๊าซ

(Universal gas constant)

3.1.4 สมการ k- ϵ Model

จากสมการการไหลแบบปั่นป่วนนั้นส่วนหนึ่งของตัวแปรจะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์หลายตัวแปรไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Partial Differential Equation) จึงนำสมการ k- ϵ Model มาใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งแบบจำลองนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

$$\mu_t = \rho C_D k^2 / \epsilon \quad (10)$$

โดยที่ k คือ ค่าของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy)

และ ϵ คือ อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน (TKE Dissipation Rate)

สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \epsilon \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (12)$$

โดยที่ G คือ Production rate of turbulence

σ_ϵ คือ Prandtl/Schmidt number สำหรับการกระจายตัว

ตัว

สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

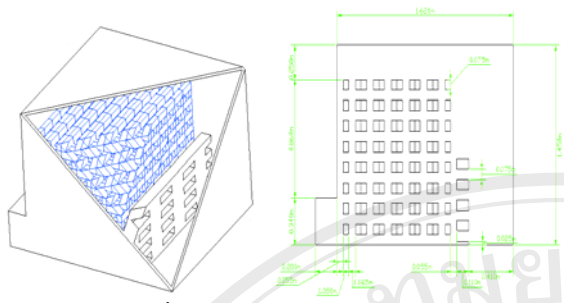
$$G = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \right] \quad (13)$$

ค่า $C_1, C_2, C_D, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ เป็นค่าคงที่ดังนี้

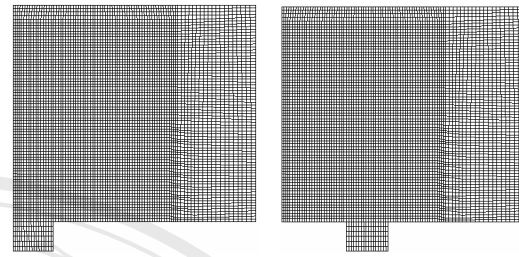
$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_D = 0.09, \sigma_k = 1.00, \sigma_\epsilon = 1.30$$

3.2 การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Modeling)

ในการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข โดยการใช้โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล CFDRC[®] เริ่มจากสร้างโดเมนในการคำนวณ ในงานวิจัยนี้ได้สร้างโดเมนที่มีลักษณะเหมือนห้องเผา เฉพาะบริเวณที่สนใจในที่นี้จะจำลองในส่วนของห้องเผาอิฐ โดยมีขนาด รูปร่างที่เหมือนกันกับเตาของจริง ในงานวิจัยได้สร้างแบบจำลอง 2 มิติ

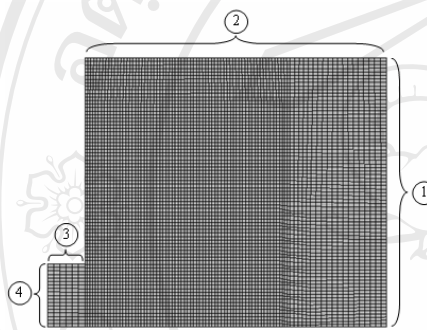


รูปที่ 3 ลักษณะห้องเผาและขนาดจริง



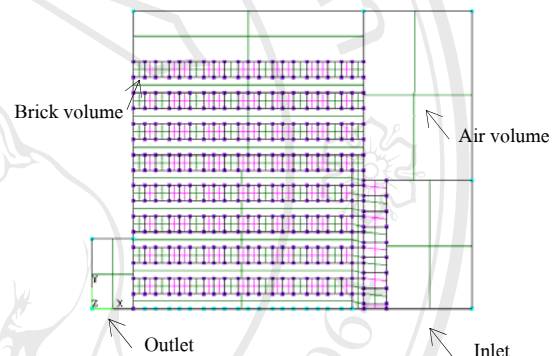
รูปที่ 5 แบบจำลองทางออกก๊าซร้อน (ก) บริเวณด้านซ้ายตรงกลาง (ข) บริเวณด้านล่าง (ค) บริเวณด้านล่างซ้าย (ง) บริเวณด้านล่างตรงกลาง

วาดแบบจำลองลงในโปรแกรม CFD-GEOM โดยเริ่มจากการกำหนดจุด (Point) ทำการลากเส้น กำหนดจุดกริด (Grid) ความละเอียดของกริดจะเป็นตัวกำหนดจุดในการคำนวณของโปรแกรม



รูปที่ 4 การสร้างกริดในแบบจำลองเชิงตัวเลข 2 มิติ

สร้างพื้นผิวแล้วกำหนดปริมาตร ปริมาตรแรกเป็นปริมาตรของก้อนอิฐเป็นของแข็ง อีกปริมาตรเป็นปริมาตรอากาศเป็นของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านกองอิฐดังรูปที่ 6

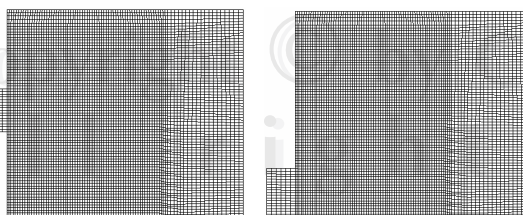


รูปที่ 6 การกำหนดปริมาตรในแบบจำลองเชิงตัวเลข 2 มิติ

ตารางที่ 3.1 จำนวนกริดที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ด้านที่	จำนวนกริด (ช่อง)
1	74
2	88
3	7
4	19
จำนวนช่องทั้งหมด	6,459

แบบจำลองที่เหลือสร้างในลักษณะเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนตำแหน่งช่องทางออกก๊าซร้อน ดังรูปที่ 5

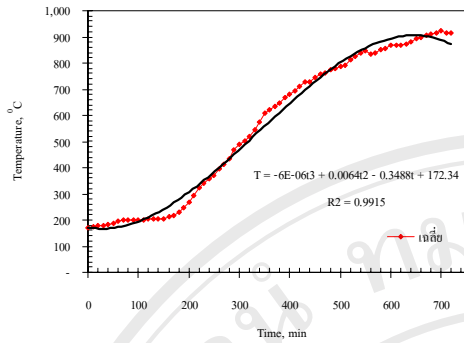


(ก)

(ข)

3.3 เงื่อนไขขอบ (Boundary Condition)

ในการคำนวณจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นหรือเงื่อนไขที่ขอบเพื่อเป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณในงานวิจัยได้กำหนดสภาวะเริ่มต้นคือ กำหนดอุณหภูมิเข้าเตาโดยการเก็บจากข้อมูลจริง 10 ครั้ง แล้วนำค่ามาเฉลี่ย ดังรูป 7 ตั้งสมมุติฐานในการคำนวณโดยกำหนดให้ของไหลเป็นอากาศร้อน (Hot Air) ไหลผ่านกองอิฐ เป็นของไหลสถานะเดียว คำนวณเป็นแบบขึ้นกับเวลา (Transient) คุณสมบัติก๊าซเป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal gas) อุณหภูมิเริ่มต้น 41°C คุณสมบัติของอิฐเป็นของแข็ง (Solid) อุณหภูมิเริ่มต้น 140°C ความดันบรรยากาศ 1 atm ใช้สมการ k- ϵ Model ในการแก้ปัญหากลไกการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) ผนังไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Adiabatic wall) ไม่มีการเลื่อนไหลที่ผนัง (No-slip wall) ความเร็วเข้า (Velocity inlet) 1.329 m/s ค่าพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) $7.156\text{E-}005\text{ m}^2/\text{s}^2$ อุณหภูมิก๊าซร้อนขึ้นตามเวลาจนถึง $1,000^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 7 การควบคุมอุณหภูมิในการเผาอิฐ

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1 ศึกษาการทำงานของระบบ

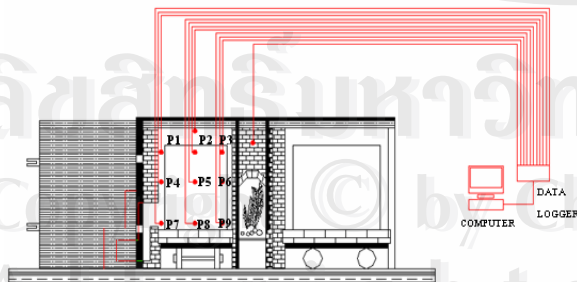
เนื่องจากเตาเป็นเตาที่ถูกออกแบบให้สามารถนำความร้อนที่กลับมาใช้ใหม่ได้อย่างคุ้มค่า จึงหาวิธีการพัฒนาประสิทธิภาพของเตาโดยศึกษาตำแหน่งช่องทางออกก๊าซร้อนที่เหมาะสมกับแบบเตาชนิดนี้

4.2 สร้างแบบจำลองการไหล

ศึกษาถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหล และ โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณในงานวิจัยใช้โปรแกรม CFDRC[®] ในการคำนวณแบบจำลองที่สร้างขึ้น เปรียบเทียบผลของการคำนวณกับข้อมูลจากการทดลองหากผลการคำนวณมีความผิดพลาด ศึกษาหาสาเหตุเช่น ตัวแปร เงื่อนไขที่ขอบ ที่กำหนดในแบบจำลองแล้วแก้ไข หากผลการคำนวณสามารถยอมรับได้จึงเปลี่ยนตำแหน่งช่องทางออกก๊าซร้อนตามที่ต้องการศึกษา

4.3 การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยต้องทำการเก็บข้อมูลที่สำคัญสองตัวแปรคือ อัตราการไหลของอากาศบริเวณทางเข้า อุณหภูมิในการเผาตลอดกระบวนการที่จุดต่างๆ ในการทดลองได้เก็บข้อมูลการกระจายอุณหภูมิไว้ดังรูป 8 และทำการวิเคราะห์ผลการคำนวณตามแบบจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับห้องเผาแบบเดิมที่ใช้อยู่



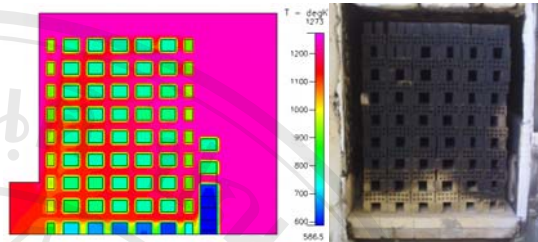
รูปที่ 8 ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิภายในเตา

5. ผลงานวิจัยและการทดลอง

5.1 ปรากฏการณ์การไหลภายในห้องเผาอิฐ

ลักษณะการไหลจะเคลื่อนตัวจากบริเวณด้านล่างขาขึ้นทางด้านบนและเคลื่อนที่ผ่านกองอิฐไปทางด้านซ้ายแล้วเคลื่อนลง

ทางด้านล่างออกทางช่องทางออกก๊าซร้อน ลักษณะการกระจายอุณหภูมิจะเริ่มจากบริเวณด้านบนนอกของกองอิฐเข้าสู่ตรงกลางกองอิฐและจากด้านบนลงสู่ด้านล่างบริเวณนี้จึงเป็นตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงที่สุด



(ก)

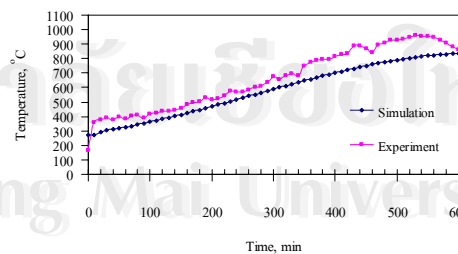
(ข)

รูปที่ 9 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับการทดลองจริง (ก) แบบจำลอง 2 มิติ ช่องทางออกทางด้านซ้ายล่าง ที่อัตราการไหล 600 kg/hr อุณหภูมิเผา 1,000 °C ที่เวลา 10 ชั่วโมง, (ข) อิฐภายในห้องเผาอิฐจากการทดลองจริง

จากแบบจำลอง รูปที่ 9 (ก) จะพบว่าบริเวณของกองอิฐที่มีอุณหภูมิค่าที่สุดจะเป็นบริเวณกองอิฐด้านล่างซึ่งเป็นปัญหาของเตาเผาอิฐชนิดนี้ซึ่งสอดคล้องกับการเก็บข้อมูลจากการเผาจริง ดังรูปที่ 9 (ข) จะเห็นว่าบริเวณด้านล่างกองอิฐมีเขม่าจากไม้ฟืนเกาะน้อยที่สุดซึ่งแสดงว่ามีก๊าซร้อนไหลผ่านทางด้านล่างน้อยทำให้การกระจายความร้อนในบริเวณส่วนนี้น้อย จากปัญหาความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านบนและด้านล่างของกองอิฐมีความแตกต่างกันมากซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการเผาอิฐ เพราะว่าอิฐบริเวณด้านบนและด้านล่างสุกแล้วแต่ยังต้องเผาต่อไปเพื่อรอให้อิฐด้านล่างสุกด้วย

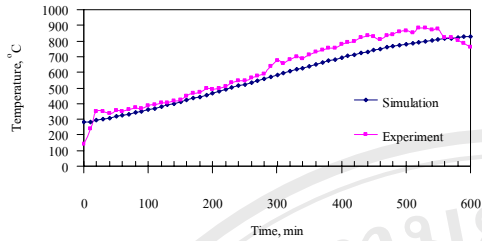
5.2 เปรียบเทียบผลกับการทดลอง (Validation)

เพื่อความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้นจึงได้มีการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลจากแบบจำลอง โดยได้เปรียบเทียบการขึ้นอุณหภูมิจริงไว้ 3 ตำแหน่ง คือ บริเวณด้านบนตรงกลางของกองอิฐ บริเวณกลางเตา และบริเวณกลางเตาด้านล่างของกองอิฐ



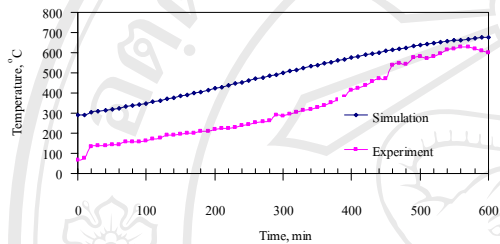
รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองกับการทดลองจริง บริเวณกลางเตาด้านบน

บริเวณกลางเตาด้านบนมีความคลาดเคลื่อนไปจากการทดลอง 15.4%



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองกับการทดลองจริงบริเวณกลางเตา

บริเวณกลางเตามีความคลาดเคลื่อนไปจากการทดลอง 9.5%

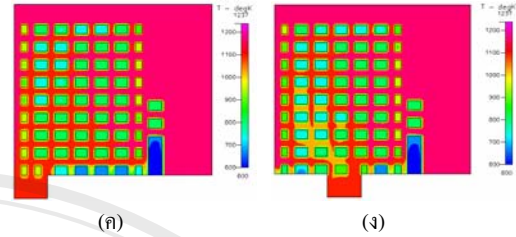
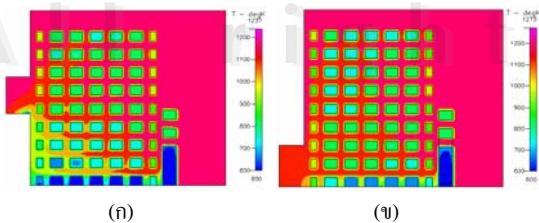


รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบแบบจำลองกับการทดลองจริงบริเวณกลางเตาด้านล่าง

บริเวณกลางเตาด้านล่างมีความคลาดเคลื่อนไปจากการทดลอง 36.6 % โดยความคลาดเคลื่อนเกิดมาจากเครื่องมือวัดและตำแหน่งในการวัด เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัดที่ไม่สามารถวัดบริเวณตรงกลางเตาด้านล่างได้ และแบบจำลองถูกสร้างแบบ 2 มิติ จึงทำให้มีการไหลแตกต่างจากความเป็นจริงที่ไหลทั้ง 3 แกน การตั้งสมมติฐานในการคำนวณที่แตกต่างจากความเป็นจริงประการแรกการสมมติให้ของไหลเป็นอากาศสถานะเดียวต่างจากการทดลองที่เป็นของไหลผสมระหว่างไอน้ำกับอากาศ ประการที่สองการกำหนดความเร็วเป็นแบบสม่ำเสมอบริเวณทางเข้า แต่จากการทดลองจะมีการไหลที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการไหลของอากาศบริเวณทางเข้าจะต้องไหลผ่านกองหินที่หนาไม่เท่ากัน ทำให้ความเร็วที่ไหลผ่านในแต่ละจุดไม่เท่ากัน

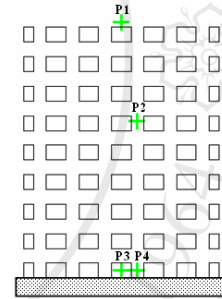
5.3 อิทธิพลของตำแหน่งช่องทางออกก๊าซร้อน

ในงานวิจัยได้ศึกษาถึงผลของตำแหน่งช่องทางออกก๊าซร้อนไว้ 4 ตำแหน่ง คือ 1. บริเวณด้านซ้ายตรงกลาง (รูปที่ 13 (ก)) 2. บริเวณด้านซ้ายล่าง (รูปที่ 13 (ข)) 3. บริเวณด้านล่างซ้าย (รูปที่ 13 (ค)) 4. บริเวณด้านล่างตรงกลาง (รูปที่ 13 (ง))

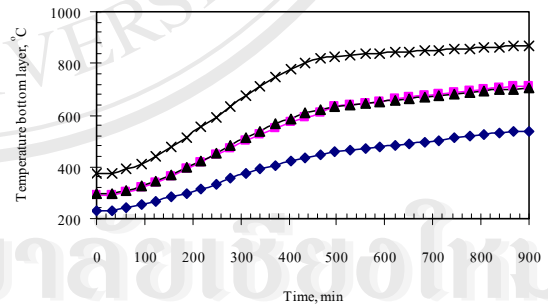


รูปที่ 13 เปรียบเทียบแบบจำลองที่บริเวณทางออก 4 ตำแหน่ง

จากแบบจำลองจะพบว่าลักษณะการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิจะเปลี่ยนไปตามตำแหน่งช่องทางออกก๊าซร้อน โดยแบบจำลองที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิน้อยที่สุดคือ แบบจำลองทางออกด้านซ้ายตรงกลาง (สังเกตจากแถบสีแดงซึ่งเป็นแถบที่อุณหภูมิสูง) และแบบจำลองที่มีการกระจายอุณหภูมิได้ดีที่สุดคือ แบบจำลองที่มีทางออกก๊าซร้อนทางด้านล่างตรงกลาง และแบบจำลองที่มีทางออกก๊าซร้อนทางด้านซ้ายล่าง และด้านล่างซ้าย มีการกระจายตัวของอุณหภูมิใกล้เคียงกัน



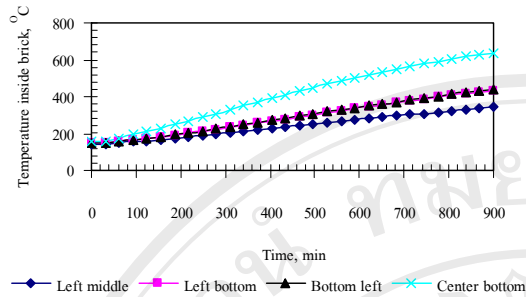
รูปที่ 14 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบอุณหภูมิในแบบจำลอง



รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิกับเวลา จุดที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในการเผา (จุด P4)

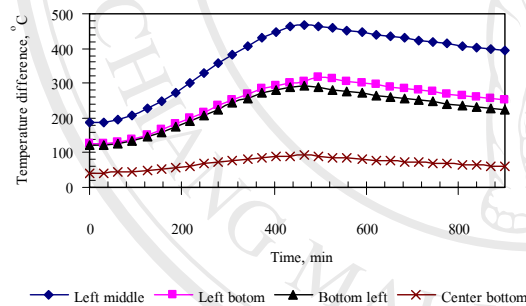
เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดด้านล่างตรงกลาง (จุด P4) ซึ่งเป็นจุดที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิในการเผาไหม้ ดังรูปที่ 15 พบว่าแบบจำลองทางออกก๊าซร้อนบริเวณกลางเตาด้านล่างมีอุณหภูมิสูงที่สุด รองลงมาคือแบบจำลองทางออกก๊าซร้อนบริเวณซ้ายล่าง แบบจำลองทางออกก๊าซร้อน

บริเวณด้านล่างซ้ายซึ่งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันและแบบจำลองทางออกก๊าซร้อนบริเวณด้านล่างตรงกลางน้อยที่สุด ตามลำดับ



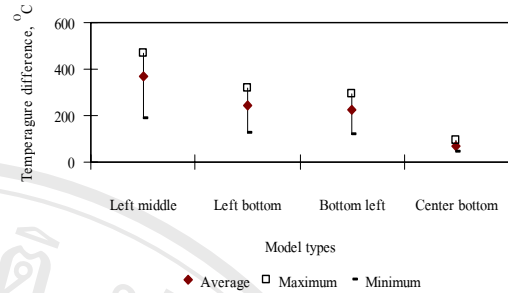
รูปที่ 16 แสดงอุณหภูมิภายในก้อนอิฐบริเวณด้านล่างสุดของแบบจำลอง (จุด P3)

จากรูปที่ 16 พบว่าแบบจำลองที่มีทางออกก๊าซร้อนบริเวณด้านล่างตรงกลาง (Center Bottom) มีการถ่ายเทความร้อนสู่อิฐสูงที่สุดเนื่องจากว่าอากาศสามารถไหลผ่านชั้นอิฐด้านล่างได้ดีที่สุด สังเกตได้จากแบบจำลองช่องทางออกก๊าซร้อนทางด้านล่างตรงกลาง (Center Bottom, รูปที่ 13 (ง)) ซึ่งจะเห็นว่าก๊าซร้อนสามารถเคลื่อนที่ได้รอบกองอิฐทางด้านล่าง



รูปที่ 17 แสดงอุณหภูมิแตกต่างระหว่างบริเวณด้านบน (จุด P1) และด้านล่าง (จุด P4) ของกองอิฐตลอดกระบวนการ

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิแตกต่างระหว่างด้านบน (จุด P1) และด้านล่าง (จุด P4) ของกองอิฐแบบจำลองช่องทางออกก๊าซร้อนบริเวณกลางเตาด้านล่าง (Center Bottom) มีอุณหภูมิแตกต่างน้อยที่สุดตลอดกระบวนการ รองลงมาแบบจำลองช่องทางออกก๊าซร้อนด้านล่างซ้าย (Bottom Left) และแบบจำลองช่องทางออกก๊าซร้อนทางด้านซ้ายล่าง (Left Bottom) ส่วนแบบจำลองช่องทางออกก๊าซร้อนกลางเตาด้านซ้าย (Left Middle) มีอุณหภูมิแตกต่างมากที่สุด



รูปที่ 18 แสดงอุณหภูมิแตกต่าง มากสุด น้อยสุด และเฉลี่ยตลอดกระบวนการทั้ง 4 โมเดล

แบบจำลองที่มีการกระจายอุณหภูมิแตกต่างระหว่างด้านบนและด้านล่างน้อยที่สุดคือ แบบจำลองทางออกก๊าซร้อนบริเวณกลางเตาด้านล่าง โดยมีความเฉลี่ย 69.7°C อุณหภูมิแตกต่างมากที่สุด 91.8°C อุณหภูมิแตกต่างน้อยที่สุด 41.5°C

6. สรุปผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์ผลการคำนวณจากแบบจำลอง แบบจำลองที่มีการกระจายอุณหภูมิได้ดีที่สุดคือ แบบจำลองทางออกก๊าซร้อนบริเวณกลางเตาด้านล่าง (Center Bottom) ซึ่งทำให้ความร้อนสามารถถ่ายเทสู่อิฐได้ดีที่สุด

แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายการกระจายอุณหภูมิสามารถอธิบายปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นจริงภายในห้องเผาและสามารถนำไปปรับปรุงลักษณะของห้องเผาให้เหมาะสมได้ต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ปราโมทย์ เชะอำไพ, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2545.
- [2] บัณฑิต ปิตทวิทก (2525), อิฐก่อสร้างและการผลิตอิฐโดยทั่วไป, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [3] ทวี พรหมพฤกษ์ (2525), เตาและการเผา Kiln & firing, สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [4] B.E. Launder, D.B. Spalding, (1974), "The numerical computation of turbulent flows", Methods Appl. Mech Eng.
- [5] Anderson, John David (1995), Computational fluid dynamics : the basics with applications, New York, McGraw-Hill
- [6] S. Prasertsan, Theppaya, G. Prateechaikul and P. Kirirat, Development of an energy-efficient brick kiln, Department of Mechanical Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Thailand 90110



ภาคผนวก ข
เตาเผาอิฐแบบประหยัดพลังงานที่ได้จัดสร้าง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ ข.1 เตาเผาอิฐแบบประหยัดพลังงาน 4 ห้องเผา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright © by Chiang Mai University
 All rights reserved

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ

นายพิศิษฐ์ นาคประเสริฐ

วัน เดือน ปี เกิด

19 มีนาคม 2524

สถานที่เกิด

ตำบลบางแก้วฟ้า อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม

ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา โรงเรียนวัดบางพระแก้วฟ้า
 ประชานุกูล จังหวัดนครปฐม ปีการศึกษา 2536

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนวัดบางพระ
 แก้วฟ้าประชานุกูล จังหวัดนครปฐม ปีการศึกษา 2539

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนภัทรญาณ
 วิทยา จังหวัดนครปฐม ปีการศึกษา 2542

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2546

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright © by Chiang Mai University

All rights reserved