ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง และผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ตาราง ก.1 แสดงผลการทดลอง ผลวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และค่าสัมประสิทธิ์เครื่องวัดแบบข้องอที่คำนวณได้จากผลการทดลอง ทั้งหมด 152 สภาวะ

ลำดับที่	ตำแหน่งข้องอ	ตำแหน่งจุดวัด (องศา)	ความเข้มข้น (% น้ำหนัก)	อัตราการไหล (ลิตร/ วินาที)	ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 1				ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 2				ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 3				ผลค่าความดันแตกต่างเฉลี่ย				สัมประสิทธิ์ข้องอ
					มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	
1	1	22.5	50.66	10.96	21.21	7	0.72	0.27	21.19	6	0.50	0.20	21.34	8	0.67	0.24	21.25	21	0.62	0.14	0.51
2	1	22.5	55.03	11.37	21.47	28	0.29	0.05	21.17	28	0.33	0.06	20.98	30	0.30	0.06	21.20	86	0.37	0.04	0.54
3	1	22.5	57.35	11.37	21.68	25	0.27	0.05	21.08	28	0.28	0.05	20.75	30	0.30	0.05	21.14	83	0.47	0.05	0.54
4	1	22.5	50.75	13.81	24.14	7	0.17	0.06	24.03	9	0.49	0.16	24.12	11	0.15	0.05	24.09	27	0.30	0.06	0.60
5	1	22.5	54.61	14.72	24.59	30	0.32	0.06	24.07	33	0.31	0.05	23.43	33	0.31	0.05	24.01	96	0.56	0.06	0.65
6	1	22.5	58.00	14.72	23.90	26	0.33	0.06	23.72	30	0.30	0.05	23.48	26	0.28	0.06	23.70	82	0.35	0.04	0.67
7	1	22.5	51.65	16.43	27.37	36	0.28	0.05	26.85	24	0.39	0.08	26.73	23	0.28	0.06	27.04	83	0.43	0.05	0.68
8	1	22.5	54.36	16.38	26.35	31	0.29	0.05	25.76	32	0.32	0.06	25.22	26	0.34	0.07	25.81	89	0.55	0.06	0.70
9	1	22.5	57.35	16.34	25.09	6	0.72	0.29	25.63	6	1.03	0.42	25.61	10	0.58	0.18	25.47	22	0.78	0.16	0.71
10	1	22.5	51.20	18.68	35.49	11	0.13	0.04	34.99	13	0.25	0.07	34.63	13	0.34	0.09	35.01	37	0.43	0.07	0.68
11	1	22.5	53.75	18.51	34.59	10	0.22	0.07	34.31	13	0.14	0.04	34.67	7	0.17	0.06	34.49	30	0.23	0.04	0.68
12	1	22.5	56.94	18.63	33.81	10	0.37	0.12	33.29	5	0.51	0.23	33.63	6	0.30	0.12	33.64	21	0.43	0.09	0.71

ตาราง ก.1 แสดงผลการทดลอง ผลวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และค่าสัมประสิทธิ์เครื่องวัดแบบข้องอที่คำนวณได้จากผลการทดลอง ทั้งหมด 152 สภาวะ (ต่อ)

ลำดับที่	ตำแหน่งข้องอ	ตำแหน่งจุดวัด (องศา)	ความเข้มข้น (% น้ำหนัก)	อัตราการไหล (ลิตร/ วินาที)	ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 1				ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 2				ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 3				ผลค่าความดันแตกต่างเฉลี่ย				สัมประสิทธิ์ข้องอ
					มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	
13	1	30	50.48	10.93	23.95	27	0.35	0.07	23.62	26	0.33	0.06	23.36	25	0.35	0.07	23.65	78	0.42	0.05	0.48
14	1	30	53.24	10.97	21.52	9	0.56	0.19	21.72	4	0.46	0.23	23.11	7	0.67	0.25	22.12	20	0.93	0.21	0.50
15	1	30	57.84	10.97	21.98	23	0.40	0.08	21.74	26	0.42	0.08	21.63	27	0.38	0.07	21.77	76	0.42	0.05	0.52
16	1	30	51.02	14.41	25.00	11	0.45	0.14	24.30	13	0.32	0.09	24.51	10	0.48	0.15	24.59	34	0.51	0.09	0.62
17	1	30	53.50	14.57	24.35	9	0.47	0.16	24.23	12	0.31	0.09	23.91	12	0.31	0.09	24.15	33	0.40	0.07	0.64
18	1	30	57.43	14.45	24.22	13	0.37	0.10	23.73	7	0.41	0.15	24.03	11	0.43	0.13	24.04	31	0.43	0.08	0.65
19	1	30	50.39	16.00	30.23	29	0.30	0.06	29.74	28	0.29	0.06	29.49	24	0.31	0.06	29.84	81	0.43	0.05	0.63
20	1	30	54.78	16.38	29.08	27	0.28	0.05	28.62	25	0.36	0.07	28.22	26	0.36	0.07	28.65	78	0.49	0.06	0.67
21	1	30	56.86	16.51	28.79	11	0.31	0.09	28.26	12	0.25	0.07	28.16	14	0.34	0.09	28.38	37	0.40	0.07	0.68
22	1	30	51.11	18.53	37.76	12	0.44	0.13	37.03	13	0.32	0.09	36.98	15	0.38	0.10	37.23	40	0.51	0.08	0.65
23	1	30	54.36	18.91	37.66	13	0.34	0.09	37.09	14	0.39	0.10	36.54	13	0.36	0.10	37.10	40	0.58	0.09	0.67
24	1	30	57.68	18.62	36.46	12	0.31	0.09	35.40	11	0.14	0.04	35.34	11	0.33	0.10	35.75	34	0.59	0.10	0.69
25	1	37.5	50.84	10.61	24.12	25	0.24	0.05	23.65	23	0.32	0.07	23.39	25	0.21	0.04	23.72	73	0.40	0.05	0.47
26	1	37.5	54.44	10.61	23.74	31	0.40	0.07	23.36	26	0.31	0.06	23.11	29	0.38	0.07	23.41	86	0.45	0.05	0.48
27	1	37.5	57.68	11.09	23.92	12	0.20	0.06	22.12	26	0.41	0.08	22.18	11	0.34	0.10	22.58	49	0.85	0.12	0.51
28	1	37.5	51.29	14.51	27.67	11	0.32	0.10	27.05	12	0.48	0.14	27.56	14	0.25	0.07	27.43	37	0.44	0.07	0.59
29	1	37.5	54.70	14.53	26.80	34	0.35	0.06	26.40	25	0.32	0.06	26.05	28	0.37	0.07	26.44	87	0.47	0.05	0.62
30	1	37.5	56.20	14.53	24.83	26	0.33	0.06	24.63	25	0.48	0.10	24.72	32	0.31	0.06	24.73	83	0.38	0.04	0.64
31	1	37.5	51.74	16.25	34.73	10	0.28	0.09	33.93	15	0.71	0.18	33.65	13	0.29	0.08	34.05	38	0.65	0.11	0.60
32	1	37.5	53.50	16.51	34.62	12	0.39	0.11	33.31	13	0.39	0.11	33.08	17	0.45	0.11	33.59	42	0.78	0.12	0.62
33	1	37.5	56.86	16.51	32.18	10	0.38	0.12	31.75	13	0.45	0.13	31.51	16	0.55	0.14	31.76	39	0.54	0.09	0.64
34	1	37.5	50.93	18.94	40.59	11	0.31	0.09	40.40	15	0.75	0.19	40.50	12	0.35	0.10	40.49	38	0.53	0.09	0.64
35	1	37.5	54.01	18.57	39.63	11	0.46	0.14	39.19	12	0.22	0.06	39.72	12	0.39	0.11	39.51	35	0.43	0.07	0.64
36	1	37.5	57.92	18.68	39.30	13	0.39	0.11	38.19	13	0.18	0.05	38.66	12	0.38	0.11	38.72	38	0.56	0.09	0.66

ตาราง ก.1 แสดงผลการทดลอง ผลวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และค่าสัมประสิทธิ์เครื่องวัดแบบข้องอที่คำนวณได้จากผลการทดลอง ทั้งหมด 152 สภาวะ (ต่อ)

ลำดับ	ตำแหน่ง	ตำแหน่งจุดวัด	ความเข้มข้น	อัตราการไหล	ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 1				ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 2				ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 3				ผลค่าความดันแตกต่างเฉลี่ย				สัมประสิทธิ์
ที่	ข้องอ	(องศา)	(% น้ำหนัก)	(ลิตร/ วินาที)	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	ข้องอ
37	1	45	51.65	10.62	24.58	13	0.31	0.09	23.89	11	0.31	0.09	23.61	9	0.24	0.08	24.09	33	0.51	0.09	0.47
38	1	45	53.24	10.62	22.60	11	0.31	0.09	21.95	11	0.37	0.11	20.56	10	0.35	0.11	21.74	32	0.91	0.16	0.49
39	1	45	56.45	11.20	20.29	26	0.33	0.06	19.99	26	0.38	0.08	20.08	26	0.35	0.07	20.12	78	0.37	0.04	0.55
40	1	45	52.10	14.81	33.00	7	0.67	0.25	33.17	8	0.59	0.21	33.52	8	1.37	0.49	33.24	23	0.94	0.20	0.55
41	1	45	53.41	14.65	31.88	27	0.73	0.14	31.32	26	0.67	0.13	30.92	28	0.78	0.15	31.37	81	0.82	0.09	0.57
42	1	45	56.62	14.56	31.69	35	0.34	0.06	30.99	27	0.35	0.07	30.84	30	0.38	0.07	31.21	92	0.53	0.05	0.57
43	1	45	51.65	15.95	36.78	12	0.50	0.15	38.23	12	0.38	0.11	37.53	11	0.40	0.12	37.51	35	0.74	0.12	0.56
44	1	45	54.27	15.95	37.29	11	0.47	0.14	37.23	10	0.63	0.20	37.07	9	0.15	0.05	37.20	30	0.47	0.08	0.57
45	1	45	56.62	16.07	35.70	7	0.47	0.18	35.64	7	0.38	0.14	35.58	8	0.66	0.23	35.64	22	0.50	0.11	0.59
46	1	45	52.01	18.55	44.25	12	0.55	0.16	43.96	12	0.35	0.10	43.54	15	0.41	0.11	43.89	39	0.52	0.08	0.60
47	1	45	54.78	18.87	42.53	8	0.48	0.17	43.01	10	0.44	0.14	42.93	6	0.55	0.23	42.83	24	0.51	0.10	0.63
48	1	45	57.59	18.30	43.18	12	0.41	0.12	42.21	14	0.49	0.13	42.21	13	0.45	0.12	42.51	39	0.63	0.10	0.62
49	2	22.5	50.21	10.87	18.60	28	0.38	0.07	18.53	26	0.41	0.08	18.59	24	0.32	0.06	18.57	78	0.37	0.04	0.54
50	2	22.5	53.75	11.30	18.51	26	0.32	0.06	18.14	26	0.34	0.07	18.07	25	0.26	0.05	18.24	77	0.36	0.04	0.57
51	2	22.5	57.11	11.30	18.25	26	0.33	0.06	17.81	26	0.32	0.06	17.49	25	0.32	0.06	17.85	77	0.45	0.05	0.59
52	2	22.5	50.66	14.51	25.23	33	0.37	0.06	24.61	37	0.35	0.06	24.31	41	0.34	0.05	24.68	111	0.51	0.05	0.63
53	2	22.5	54.18	14.69	24.23	9	0.21	0.07	23.54	8	0.24	0.08	23.82	13	0.45	0.13	23.87	30	0.43	0.08	0.65
54	2	22.5	56.29	14.68	23.88	39	0.24	0.04	23.60	40	0.34	0.05	23.43	35	0.36	0.06	23.65	114	0.36	0.03	0.66
55	2	22.5	51.83	16.49	32.82	13	0.45	0.12	32.08	9	0.36	0.12	31.89	11	0.64	0.19	32.31	33	0.64	0.11	0.62
56	2	22.5	53.84	16.43	33.09	10	0.39	0.12	31.95	11	0.47	0.14	31.71	12	0.33	0.10	32.21	33	0.71	0.12	0.63
57	2	22.5	56.37	16.47	28.49	16	0.71	0.18	27.89	9	0.52	0.17	28.38	13	0.47	0.13	28.31	38	0.63	0.10	0.68
58	2	22.5	50.48	18.63	34.60	11	0.26	0.08	33.77	14	0.46	0.12	33.34	11	0.16	0.05	33.89	36	0.60	0.10	0.68
59	2	22.5	54.01	18.57	34.33	11	0.39	0.12	33.22	11	0.33	0.10	32.80	11	0.34	0.10	33.45	33	0.74	0.13	0.70
60	2	22.5	57.03	18.68	34.43	11	0.42	0.13	33.12	15	0.48	0.12	32.71	14	0.36	0.10	33.34	40	0.82	0.13	0.71

ตาราง ก.1 แสดงผลการทดลอง ผลวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และค่าสัมประสิทธิ์เครื่องวัดแบบข้องอที่คำนวณได้จากผลการทดลอง ทั้งหมด 152 สภาวะ (ต่อ)

ลำดับ	ตำแหน่ง	ตำแหน่งจุดวัด	ความเข้มข้น	อัตราการไหล	ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 1				ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 2				ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 3				ผลค่าความดันแตกต่างเฉลี่ย				สัมประสิทธิ์
ที่	ข้องอ	(องศา)	(% น้ำหนัก)	(ลิตร/ วินาที)	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	ข้องอ
61	2	30	51.29	10.62	21.78	30	0.33	0.06	21.39	27	0.38	0.07	21.00	25	0.34	0.07	21.41	82	0.47	0.05	0.49
62	2	30	55.62	10.62	21.14	30	0.32	0.06	20.71	28	0.40	0.08	20.25	24	0.27	0.06	20.73	82	0.49	0.05	0.51
63	2	30	56.29	11.20	21.16	30	0.28	0.05	20.55	27	0.32	0.06	20.29	25	0.30	0.06	20.69	82	0.47	0.05	0.54
64	2	30	51.56	14.51	28.45	34	0.33	0.06	27.93	30	0.37	0.07	27.50	30	0.39	0.07	27.98	94	0.54	0.06	0.59
65	2	30	53.84	14.81	28.23	35	0.35	0.06	27.73	28	0.39	0.07	27.37	28	0.35	0.07	27.81	91	0.51	0.05	0.61
66	2	30	57.27	14.51	27.66	10	0.47	0.15	27.44	14	0.70	0.19	28.18	12	0.28	0.08	27.75	36	0.60	0.10	0.61
67	2	30	51.38	16.38	33.26	8	0.28	0.10	33.89	9	0.10	0.03	32.89	8	0.53	0.19	33.37	25	0.54	0.11	0.61
68	2	30	54.36	16.09	32.88	10	0.32	0.10	31.88	12	0.48	0.14	32.06	11	0.13	0.04	32.24	33	0.55	0.10	0.62
69	2	30	56.70	16.00	31.69	18	0.41	0.10	30.94	12	0.34	0.10	30.64	9	0.31	0.10	31.22	39	0.58	0.09	0.63
70	2	30	50.12	18.68	34.73	11	0.46	0.14	35.82	13	0.60	0.17	35.92	9	0.80	0.27	35.48	33	0.81	0.14	0.67
71	2	30	54.86	18.63	35.71	12	0.33	0.09	35.13	15	0.39	0.10	34.54	12	0.31	0.09	35.13	39	0.57	0.09	0.68
72	2	30	56.70	18.51	35.91	13	0.48	0.13	34.79	14	0.31	0.08	34.04	11	0.43	0.13	34.96	38	0.86	0.14	0.69
73	2	37.5	50.02	10.80	23.25	27	0.38	0.07	22.76	28	0.41	0.08	22.56	27	0.35	0.07	22.86	82	0.48	0.05	0.48
74	2	37.5	53.67	11.37	22.06	27	0.36	0.07	22.68	31	0.75	0.13	23.18	32	0.55	0.10	22.67	90	0.73	0.08	0.52
75	2	37.5	56.20	11.37	19.77	10	0.39	0.12	20.63	15	0.31	0.08	21.56	14	0.33	0.09	20.74	39	0.78	0.12	0.55
76	2	37.5	51.47	14.56	27.91	13	0.65	0.18	28.34	10	0.50	0.16	28.01	10	0.50	0.16	28.07	33	0.58	0.10	0.59
77	2	37.5	54.86	14.72	26.16	36	0.45	0.08	25.02	41	0.43	0.07	24.63	48	0.50	0.07	25.20	125	0.79	0.07	0.64
78	2	37.5	57.35	14.72	25.45	39	0.43	0.07	24.94	42	0.49	0.08	24.64	39	0.42	0.07	25.01	120	0.56	0.05	0.65
79	2	37.5	51.20	16.34	35.88	9	0.32	0.11	35.43	11	0.34	0.10	35.23	10	0.36	0.11	35.50	30	0.43	0.08	0.59
80	2	37.5	53.84	16.43	35.31	5	0.13	0.06	34.90	5	0.44	0.20	34.84	9	0.66	0.22	34.98	19	0.53	0.12	0.60
81	2	37.5	58.08	16.38	35.38	11	0.50	0.15	34.55	10	0.44	0.14	34.36	12	0.18	0.05	34.76	33	0.59	0.10	0.61
82	2	37.5	50.66	18.30	39.72	17	0.27	0.07	38.61	10	0.39	0.12	38.24	14	0.46	0.12	38.95	41	0.77	0.12	0.63
83	2	37.5	53.41	18.86	38.13	13	0.36	0.10	37.83	11	0.25	0.07	37.20	12	0.46	0.13	37.73	36	0.54	0.09	0.66
84	2	37.5	56.45	18.95	37.45	22	0.39	0.08	37.30	12	0.29	0.08	37.16	13	0.32	0.09	37.33	47	0.36	0.05	0.68

ตาราง ก.1 แสดงผลการทดลอง ผลวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และค่าสัมประสิทธิ์เครื่องวัดแบบข้องอที่คำนวณได้จากผลการทดลอง ทั้งหมด 152 สภาวะ (ต่อ)

ลำดับที่	ตำแหน่งข้องอ	ตำแหน่งจุดวัด (องศา)	ความเข้มข้น (% น้ำหนัก)	อัตราการไหล (ลิตร/ วินาที)	ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 1				ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 2				ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 3				ผลค่าความดันแตกต่างเฉลี่ย				สัมประสิทธิ์ข้องอ
					มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	
85	2	45	50.48	10.96	27.23	28	0.35	0.07	27.00	27	0.29	0.06	26.96	25	0.34	0.07	27.07	80	0.35	0.04	0.45
86	2	45	54.95	10.61	27.23	29	0.30	0.06	27.09	27	0.34	0.07	26.90	27	0.38	0.07	27.08	83	0.36	0.04	0.44
87	2	45	57.43	10.61	27.01	33	0.29	0.05	26.58	25	0.36	0.07	26.22	27	0.28	0.05	26.63	85	0.45	0.05	0.45
88	2	45	51.29	14.47	32.37	34	0.41	0.07	31.55	30	0.39	0.07	31.21	33	0.39	0.07	31.72	97	0.63	0.06	0.55
89	2	45	54.27	14.57	30.35	39	0.38	0.06	29.29	34	0.40	0.07	28.88	32	0.37	0.07	29.56	105	0.74	0.07	0.58
90	2	45	56.12	13.93	28.74	16	0.40	0.10	28.24	10	0.41	0.13	28.41	9	0.14	0.05	28.51	35	0.41	0.07	0.57
91	2	45	51.74	16.86	40.11	13	0.45	0.12	39.50	17	0.47	0.11	39.15	16	0.24	0.06	39.55	46	0.54	0.08	0.58
92	2	45	53.93	16.38	37.93	12	0.24	0.07	37.43	12	0.36	0.11	36.67	14	0.50	0.13	37.31	38	0.65	0.11	0.58
93	2	45	56.70	16.00	37.19	15	0.32	0.08	35.61	14	0.34	0.09	35.87	15	0.43	0.11	36.24	44	0.79	0.12	0.58
94	2	45	52.01	18.41	41.76	11	0.37	0.11	41.49	12	0.49	0.14	41.22	12	0.54	0.16	41.48	35	0.51	0.09	0.62
95	2	45	54.61	18.53	41.56	13	0.35	0.10	40.85	13	0.37	0.10	40.56	9	0.38	0.13	41.04	35	0.55	0.09	0.63
96	2	45	57.68	18.41	41.00	12	0.43	0.12	40.85	15	0.36	0.09	40.49	12	0.15	0.04	40.79	39	0.39	0.06	0.64
97	3	22.5	52.10	11.04	19.65	29	0.40	0.07	19.14	23	0.32	0.07	18.92	34	0.41	0.07	19.22	86	0.49	0.05	0.54
98	3	22.5	54.95	10.87	20.00	11	0.37	0.11	19.46	9	0.32	0.11	17.10	15	0.26	0.07	18.62	35	1.39	0.23	0.55
99	3	22.5	56.62	10.61	19.40	9	0.44	0.15	19.04	11	0.41	0.12	18.72	11	0.39	0.12	19.03	31	0.49	0.09	0.53
100	3	22.5	51.20	14.56	21.94	7	0.39	0.15	20.41	11	1.01	0.30	20.56	9	0.64	0.21	20.86	27	0.99	0.19	0.68
101	3	22.5	54.78	14.57	20.49	15	0.36	0.09	19.57	12	0.34	0.10	19.60	10	0.32	0.10	19.95	37	0.56	0.09	0.71
102	3	22.5	57.11	13.98	20.14	6	1.05	0.43	19.56	6	0.88	0.36	19.33	6	2.07	0.84	19.68	18	1.39	0.33	0.69
103	3	22.5	51.29	16.43	26.43	14	0.42	0.11	26.35	12	0.45	0.13	26.37	12	0.61	0.18	26.39	38	0.48	0.08	0.69
104	3	22.5	54.61	16.00	25.76	12	0.33	0.09	25.04	10	0.24	0.07	25.30	13	0.33	0.09	25.38	35	0.42	0.07	0.69
105	3	22.5	57.35	16.47	25.26	14	0.36	0.10	24.81	11	0.42	0.13	24.72	9	0.39	0.13	24.97	34	0.45	0.08	0.73
106	3	22.5	51.02	18.68	30.32	15	0.35	0.09	29.73	10	0.31	0.10	29.46	13	0.37	0.10	29.87	38	0.51	0.08	0.73
107	3	22.5	54.61	19.04	29.30	14	0.40	0.11	28.80	13	0.34	0.09	29.37	12	0.18	0.05	29.15	39	0.41	0.07	0.77
108	3	22.5	56.70	18.91	27.80	27	0.30	0.06	27.42	24	0.40	0.07	27.01	25	0.30	0.06	27.42	76	0.45	0.05	0.79

ตาราง ก.1 แสดงผลการทดลอง ผลวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และค่าสัมประสิทธิ์เครื่องวัดแบบข้องอที่คำนวณได้จากผลการทดลอง ทั้งหมด 152 สภาวะ (ต่อ)

ลำดับ	ตำแหน่ง	ตำแหน่งจุดวัด	ความเข้มข้น	อัตราการไหล	ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 1				ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 2				ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 3				ผลค่าความดันแตกต่างเฉลี่ย				สัมประสิทธิ์
ที่	ข้องอ	(องศา)	(% น้ำหนัก)	(ลิตร/ วินาที)	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	ข้องอ
109	3	30	50.02	10.80	20.04	43	0.59	0.09	19.86	31	0.50	0.09	19.78	26	0.44	0.09	19.91	100	0.53	0.05	0.52
110	3	30	53.15	11.12	18.47	25	0.30	0.06	18.17	26	0.28	0.05	18.07	27	0.27	0.05	18.23	78	0.33	0.04	0.56
111	3	30	56.86	10.97	17.73	27	0.31	0.06	17.42	27	0.28	0.05	17.33	25	0.32	0.06	17.50	79	0.35	0.04	0.58
112	3	30	51.47	14.56	24.17	25	0.35	0.07	23.77	26	0.38	0.07	23.40	24	0.30	0.06	23.78	75	0.46	0.05	0.64
113	3	30	53.15	14.72	23.30	27	0.33	0.06	22.68	26	0.33	0.06	22.30	35	0.34	0.06	22.72	88	0.53	0.06	0.67
114	3	30	56.53	14.72	22.51	11	0.25	0.08	22.18	12	0.25	0.07	22.31	14	0.42	0.11	22.33	37	0.34	0.06	0.68
115	3	30	51.20	16.34	26.99	30	0.35	0.06	26.64	39	0.35	0.06	26.60	35	0.33	0.06	26.73	104	0.38	0.04	0.68
116	3	30	54.53	16.04	27.39	9	0.35	0.12	25.34	12	0.34	0.10	25.01	12	0.28	0.08	25.78	33	1.06	0.18	0.69
117	3	30	56.62	15.97	25.62	26	0.29	0.06	25.27	30	0.43	0.08	25.04	28	0.31	0.06	25.30	84	0.42	0.05	0.70
118	3	30	50.66	18.74	35.19	12	0.29	0.08	34.49	11	0.34	0.10	34.09	15	0.34	0.09	34.55	38	0.57	0.09	0.68
119	3	30	53.58	18.93	32.71	11	0.26	0.08	32.37	11	0.33	0.10	32.15	14	0.41	0.11	32.39	36	0.41	0.07	0.72
120	3	30	56.37	18.74	31.96	11	0.46	0.14	31.62	11	0.37	0.11	31.77	9	0.36	0.12	31.78	31	0.42	0.07	0.73
121	3	37.5	51.38	11.20	20.60	29	0.31	0.06	20.29	23	0.29	0.06	20.02	26	0.33	0.06	20.32	78	0.39	0.04	0.53
122	3	37.5	54.61	11.12	20.23	27	0.38	0.07	19.86	28	0.30	0.06	19.21	27	0.27	0.05	19.77	82	0.53	0.06	0.54
123	3	37.5	57.92	11.21	20.14	28	0.36	0.07	19.37	25	0.31	0.06	19.05	27	0.37	0.07	19.53	80	0.58	0.06	0.56
124	3	37.5	51.56	14.51	24.75	29	0.33	0.06	24.70	27	0.30	0.06	24.60	21	0.26	0.06	24.69	77	0.30	0.03	0.63
125	3	37.5	53.06	14.60	24.75	32	0.32	0.06	24.15	29	0.37	0.07	23.74	29	0.37	0.07	24.23	90	0.55	0.06	0.64
126	3	37.5	56.70	14.42	22.98	28	0.35	0.07	22.60	24	0.42	0.09	22.48	27	0.34	0.07	22.69	79	0.42	0.05	0.66
127	3	37.5	51.38	16.38	29.80	54	0.43	0.06	29.55	47	0.44	0.06	29.59	44	0.44	0.07	29.66	145	0.45	0.04	0.65
128	3	37.5	53.93	16.89	29.56	34	0.33	0.06	29.34	39	0.26	0.04	29.36	34	0.35	0.06	29.42	107	0.33	0.03	0.68
129	3	37.5	58.00	16.38	29.31	6	0.35	0.14	29.33	4	1.15	0.57	29.65	5	0.35	0.16	29.43	15	0.62	0.16	0.67
130	3	37.5	50.30	18.74	38.22	14	0.32	0.09	37.02	14	0.38	0.10	36.89	15	0.42	0.11	37.36	43	0.71	0.11	0.66
131	3	37.5	53.15	18.87	37.92	11	0.36	0.11	37.35	12	0.26	0.07	36.64	13	0.38	0.11	37.27	36	0.63	0.10	0.67
132	3	37.5	56.04	18.86	37.45	13	0.43	0.12	36.78	12	0.42	0.12	37.06	14	0.27	0.07	37.11	39	0.46	0.07	0.68

ตาราง ก.1 แสดงผลการทดลอง ผลวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และค่าสัมประสิทธิ์เครื่องวัดแบบข้องอที่คำนวณได้จากผลการทดลอง ทั้งหมด 152 สภาวะ (ต่อ)

ลำดับที่	ตำแหน่งข้องอ	ตำแหน่งจุดวัด (องศา)	ความเข้มข้น (% น้ำหนัก)	อัตราการไหล (ลิตร/ วินาที)	ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 1				ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 2				ผลการวัดค่าความดันแตกต่าง ครั้งที่ 3				ผลค่าความดันแตกต่างเฉลี่ย				สัมประสิทธิ์ข้องอ
					มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	มิลลิบาร์	ข้อมูล	Std Dev	Std Err	
133	3	45	50.21	10.61	22.24	27	0.29	0.06	21.84	24	0.29	0.06	21.40	25	0.29	0.06	21.84	76	0.45	0.05	0.49
134	3	45	53.41	10.61	22.09	25	0.31	0.06	21.63	26	0.37	0.07	21.30	31	0.30	0.05	21.65	82	0.46	0.05	0.49
135	3	45	57.11	11.04	20.74	34	0.31	0.05	20.38	30	0.35	0.06	20.36	23	0.34	0.07	20.52	87	0.37	0.04	0.54
136	3	45	51.56	14.69	28.69	12	0.37	0.11	28.86	10	0.51	0.16	29.30	12	0.53	0.15	28.96	34	0.53	0.09	0.59
137	3	45	54.78	14.38	29.01	38	0.32	0.05	28.78	42	0.40	0.06	28.46	30	0.35	0.06	28.77	110	0.42	0.04	0.58
138	3	45	58.08	14.53	27.98	27	0.33	0.06	27.52	30	0.41	0.07	27.59	30	0.37	0.07	27.68	87	0.42	0.04	0.61
139	3	45	50.66	16.69	32.58	40	0.41	0.06	32.30	33	0.32	0.06	32.19	28	0.39	0.07	32.38	101	0.41	0.04	0.63
140	3	45	53.58	15.97	32.15	30	0.33	0.06	31.89	29	0.32	0.06	31.91	29	0.41	0.08	31.98	88	0.37	0.04	0.61
141	3	45	57.84	15.97	31.79	10	0.62	0.20	31.17	9	0.48	0.16	30.77	9	0.22	0.07	31.26	28	0.63	0.12	0.63
142	3	45	50.02	18.86	38.55	12	0.36	0.10	37.79	8	0.39	0.14	37.58	12	0.23	0.07	37.99	32	0.55	0.10	0.65
143	3	45	54.18	18.86	37.53	12	0.31	0.09	36.73	11	0.36	0.11	36.08	12	0.48	0.14	36.78	35	0.72	0.12	0.68
144	3	45	57.76	18.94	37.67	14	0.34	0.09	36.41	13	0.37	0.10	35.77	11	0.46	0.14	36.69	38	0.89	0.14	0.69
145	1	45	57.35	10.02	24.73	26	0.34	0.07	24.65	29	0.24	0.04	24.62	29	0.29	0.05	24.66	84	0.29	0.03	0.44
146	1	45	56.45	14.15	29.47	32	0.35	0.06	29.27	26	0.27	0.05	29.16	26	0.24	0.05	29.31	84	0.32	0.04	0.57
147	1	45	56.20	15.84	35.39	11	0.40	0.12	35.07	14	0.38	0.10	35.11	15	0.39	0.10	35.17	40	0.40	0.06	0.59
148	1	45	56.45	18.86	42.77	27	0.40	0.08	42.49	28	0.38	0.07	42.27	27	0.33	0.06	42.51	82	0.42	0.05	0.63
149	2	45	-	10.10	4.49	29	0.28	0.05	4.43	29	0.29	0.05	4.51	25	0.26	0.05	4.48	83	0.28	0.03	0.868
150	2	45	-	13.89	8.46	28	0.19	0.04	8.39	25	0.34	0.07	8.65	27	0.22	0.04	8.50	80	0.28	0.03	0.867
151	2	45	-	16.38	11.79	25	0.32	0.06	11.64	28	0.31	0.06	11.87	25	0.29	0.06	11.76	78	0.32	0.04	0.869
152	2	45	-	18.41	14.61	27	0.27	0.05	14.90	27	0.30	0.06	14.76	26	0.21	0.04	14.76	80	0.29	0.03	0.872

ตาราง ก.2 แสดงค่าความหนาแน่นของน้ำยิปซัม ในระบบท่อและตำแหน่งต่างๆ ในแกนหน้าตัดจุดวัดความดัน ที่ได้จากผลการทดลอง ทั้งหมด 12 สภาวะ

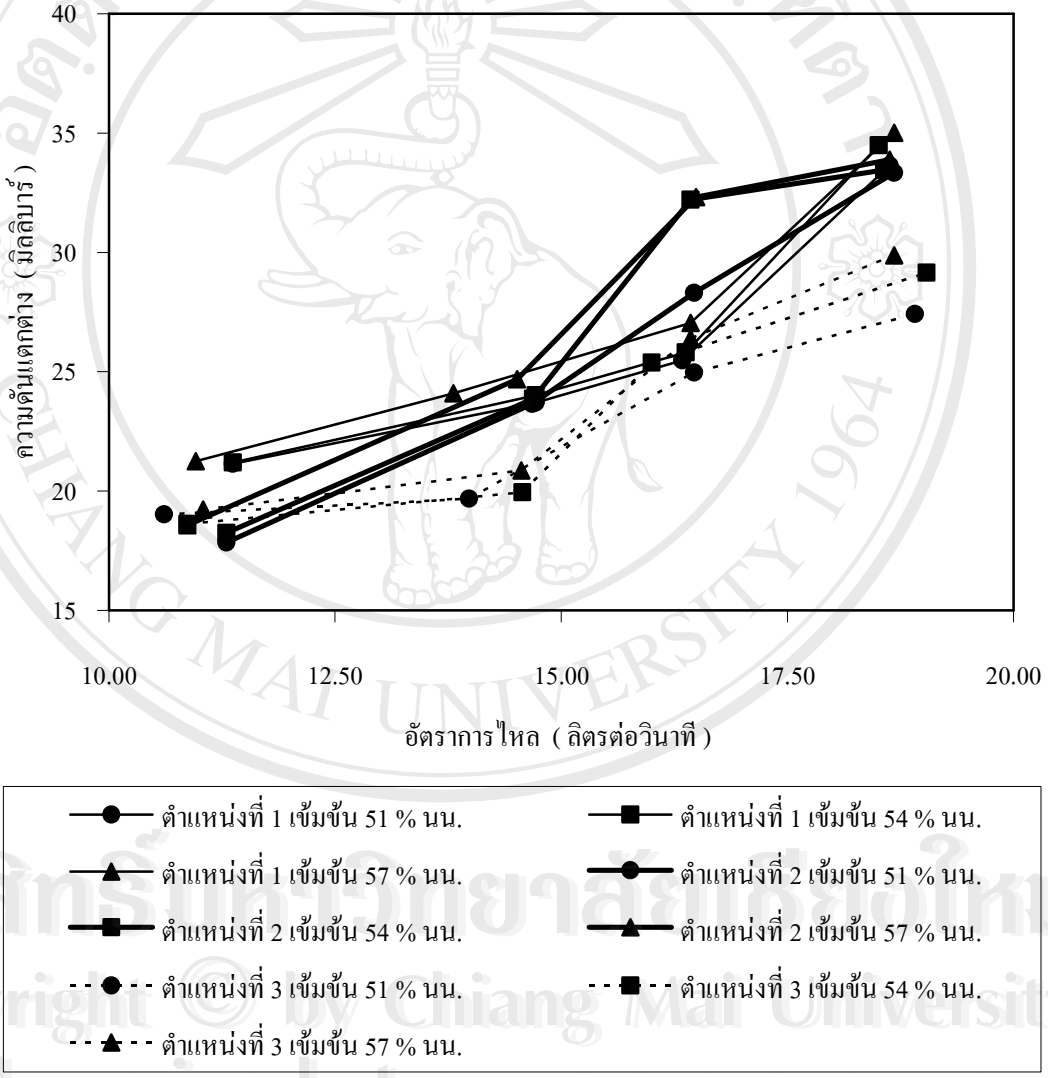
ลำดับที่	ตำแหน่งข้องอ	ตำแหน่งจุดวัด (องศา)	ความเข้มข้น (% น้ำหนัก)	ความหนาแน่นในท่อทดลอง (kg /m^3)	ผลการวัดค่าความหนาแน่น ที่ตำแหน่งต่างๆ ในแกนหน้าตัดจุดวัดความดัน (kg /m^3)						ค่าในจุดวัดความดันเบี่ยงเบนจากในท่อ (%)	
					0.1 เท่าขนาดข้องอ	0.2 เท่าขนาดข้องอ	0.4 เท่าขนาดข้องอ	0.6 เท่าขนาดข้องอ	0.8 เท่าขนาดข้องอ	0.9 เท่าขนาดข้องอ	ค่าน้อยกว่า	ค่ามากกว่า
1	1	22.5	54.36	1423	1447	1398	1446	1459	1473	1479	-1.76	3.94
2	1	30	53.24	1410	1399	1382	1434	1401	1446	1460	-1.99	3.55
3	1	37.5	54.70	1427	1467	1462	1434	1408	1422	1441	-1.33	2.80
4	1	45	53.41	1412	1446	1461	1419	1401	1413	1425	-0.78	3.47
5	2	22.5	54.18	1421	1385	1424	1393	1434	1482	1502	-2.53	5.70
6	2	30	54.86	1429	1415	1441	1416	1464	1472	1497	-0.98	4.76
7	2	37.5	53.41	1412	1424	1457	1417	1411	1399	1414	-0.92	3.19
8	2	45	54.61	1426	1403	1482	1454	1437	1423	1427	-1.61	3.93
9	3	22.5	54.95	1430	1566	1509	1389	1430	1358	1332	-6.85	9.51
10	3	30	53.15	1409	1493	1475	1353	1518	1387	1366	-3.97	7.74
11	3	37.5	53.93	1418	1383	1419	1244	1455	1468	1419	-12.27	3.53
12	3	45	54.18	1421	1369	1285	1424	1202	1452	1398	-15.41	2.18

ตาราง ก.3 แสดงผลการวัด ค่าอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำยิปซัม และค่าความดันแตกต่างของข้องอในตำแหน่งที่ 1 มีจุดวัดความดันที่มุม 45 องศา ที่ระดับน้ำยิปซัมในถังสะสม ทั้งหมด 10 ระดับ ได้แก่ 5.2, 5.0, 4.6, 4.2, 3.8, 3.4, 3.0, 2.6, 2.2, และ 1.8 เมตร

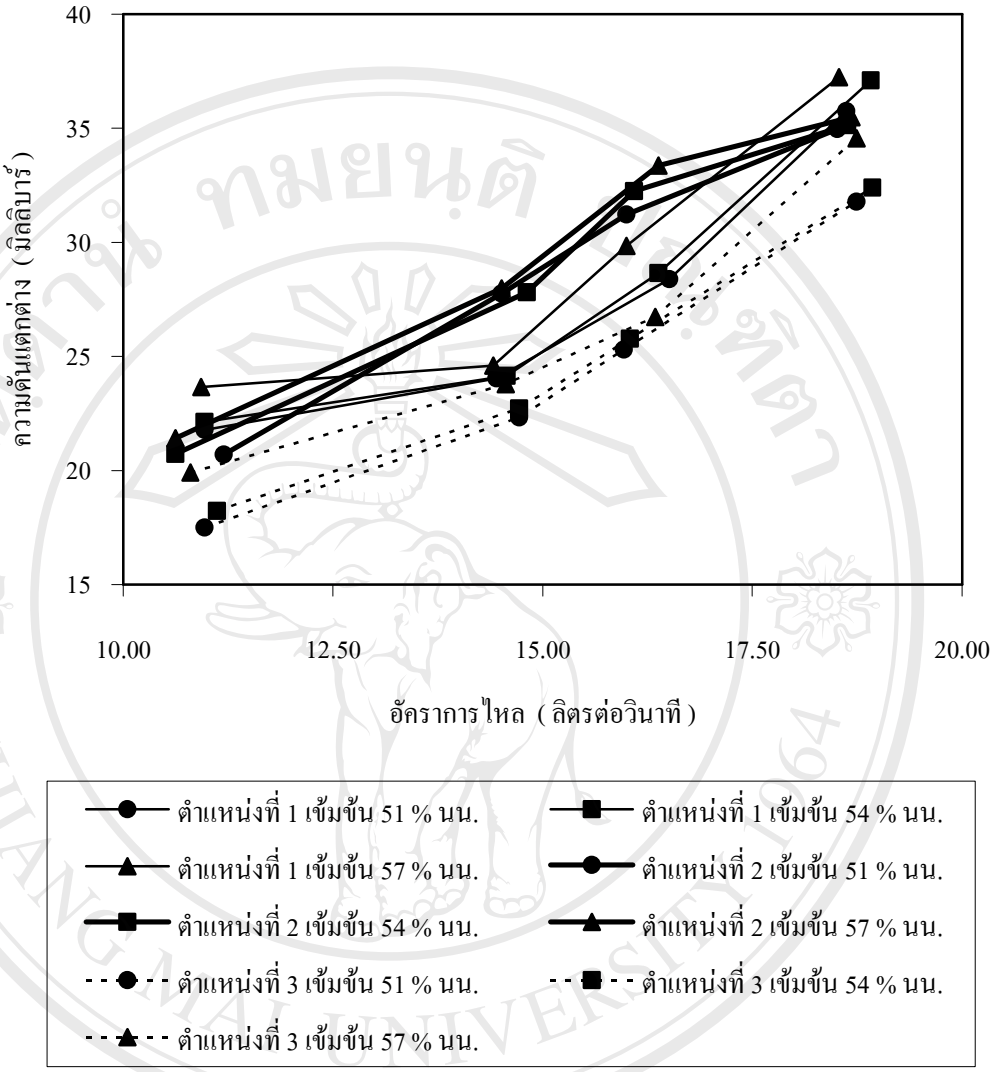
ลำดับที่	ระดับน้ำยิปซัม (เมตร)	อัตราการไหล (ลิตรต่อวินาที)	ความดันแตกต่าง จากผลการทดลอง (มิลลิบาร์)
1	5.2	16.10	36.73
2	5.0	15.82	35.99
3	4.6	15.44	35.06
4	4.2	15.21	34.45
5	3.8	14.68	33.12
6	3.4	14.26	32.13
7	3.0	13.82	30.77
8	2.6	13.39	29.84
9	2.2	12.84	28.31
10	1.8	12.20	26.8

ภาคผนวก ข

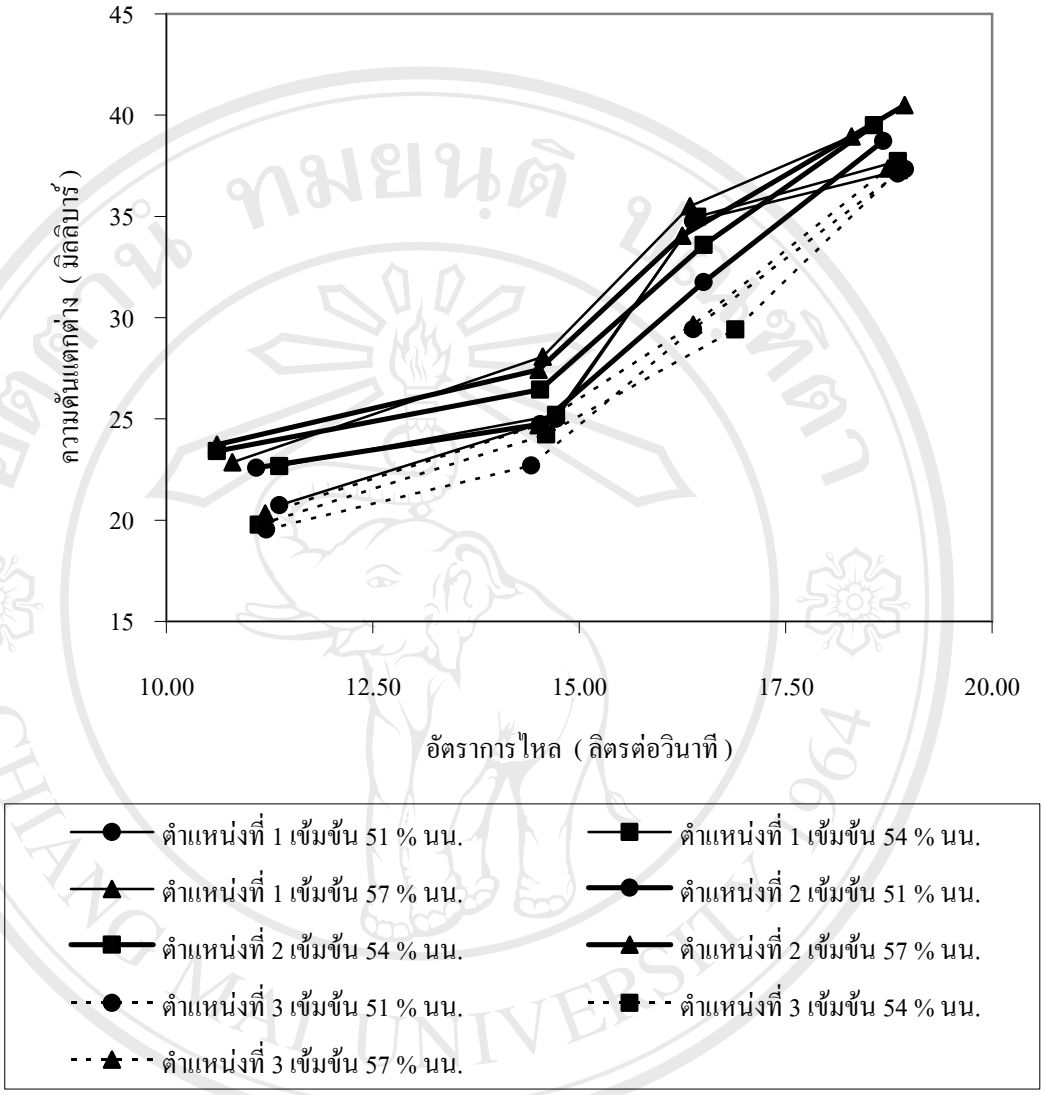
ข้อมูลผลการทดลอง ที่แสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์



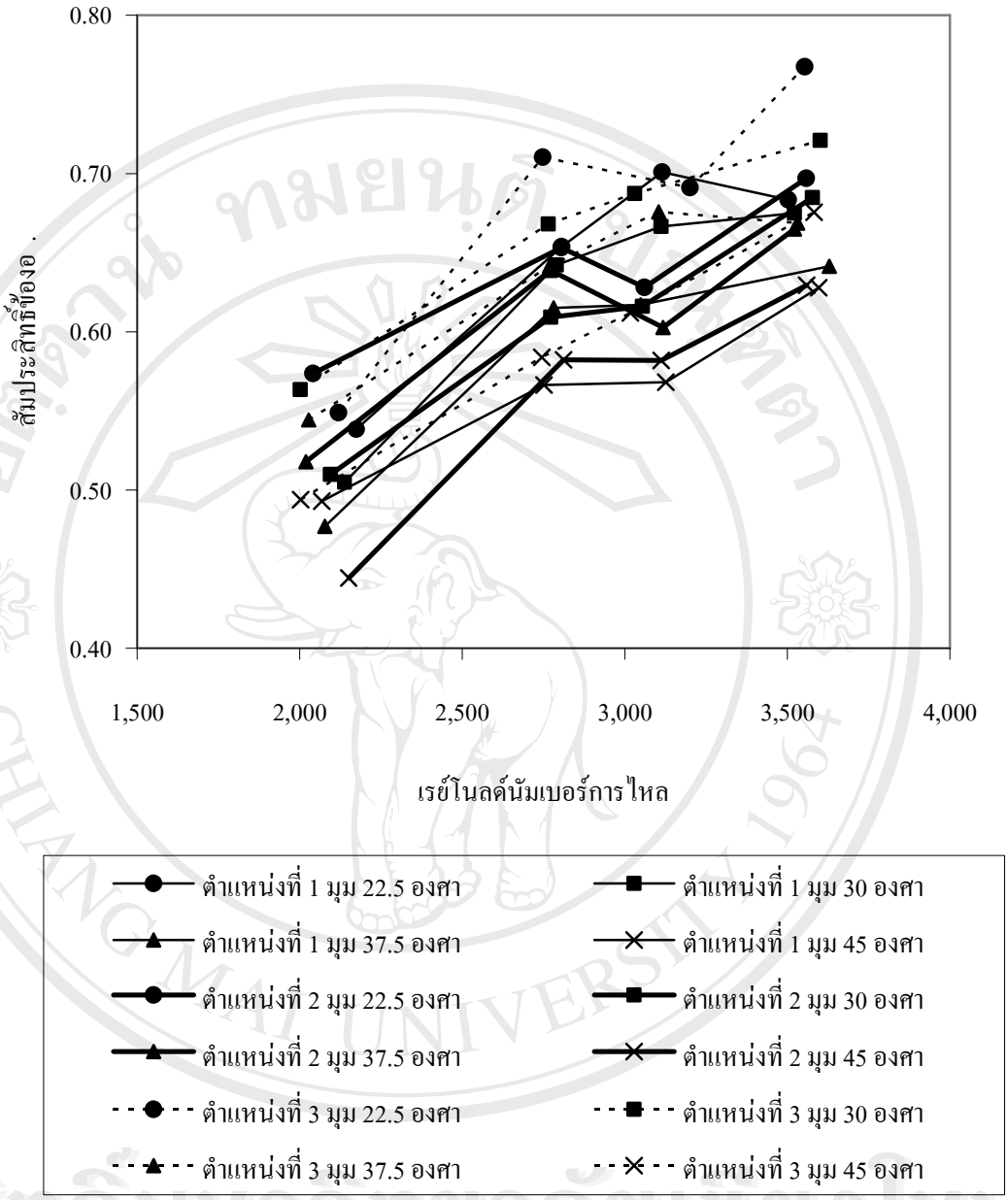
รูป ข.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความดันแตกต่าง และค่าอัตราการไหล แยกตามตำแหน่งข้องอ และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม ของข้องอที่มีจุดวัดความดันที่มุม 22.5 องศา



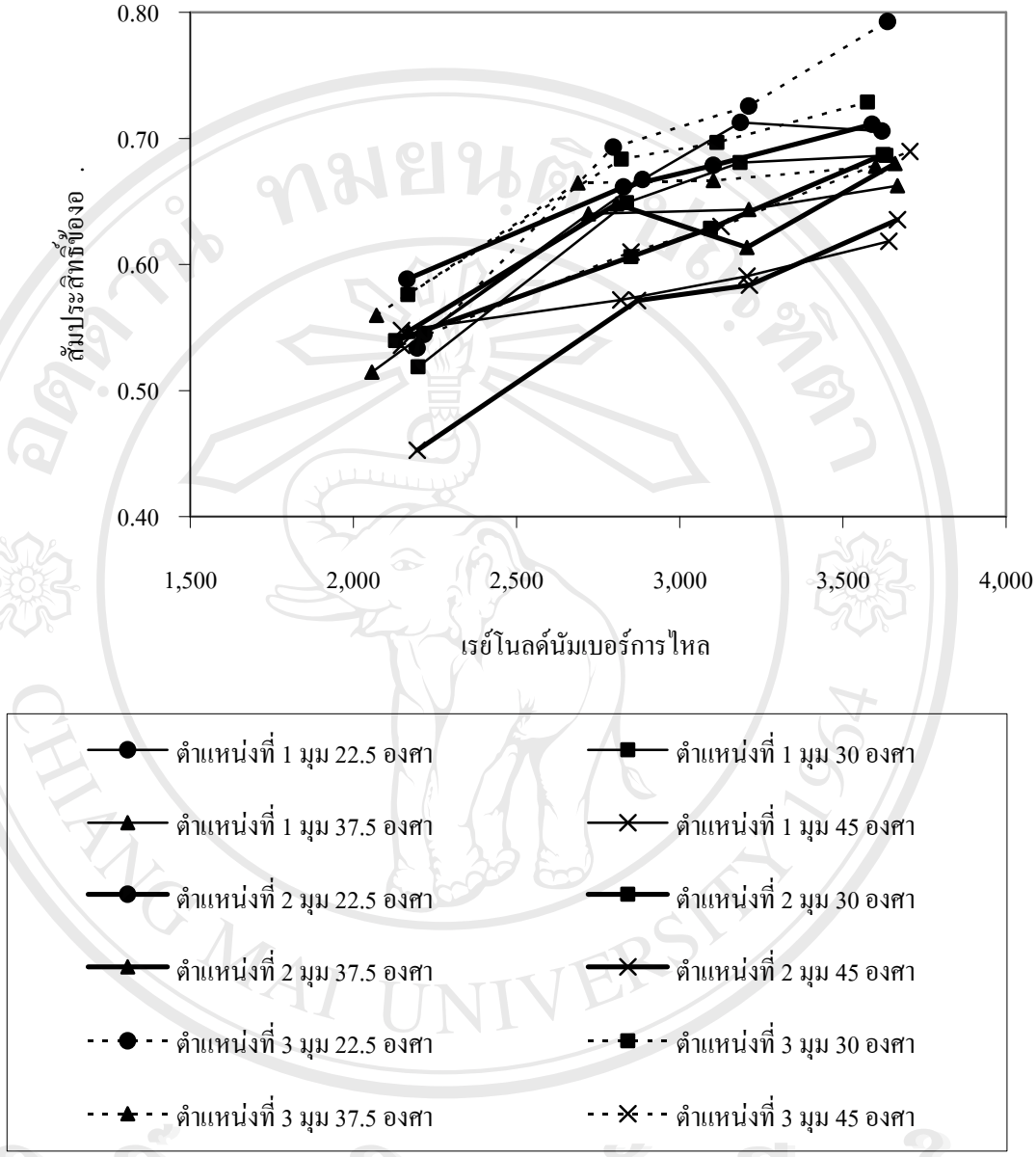
รูป ข.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความดันแตกต่าง และค่าอัตราการไหล แยกตามตำแหน่งข้องอ และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม ของข้องอที่มีจุดวัดความดันที่มุม 30 องศา



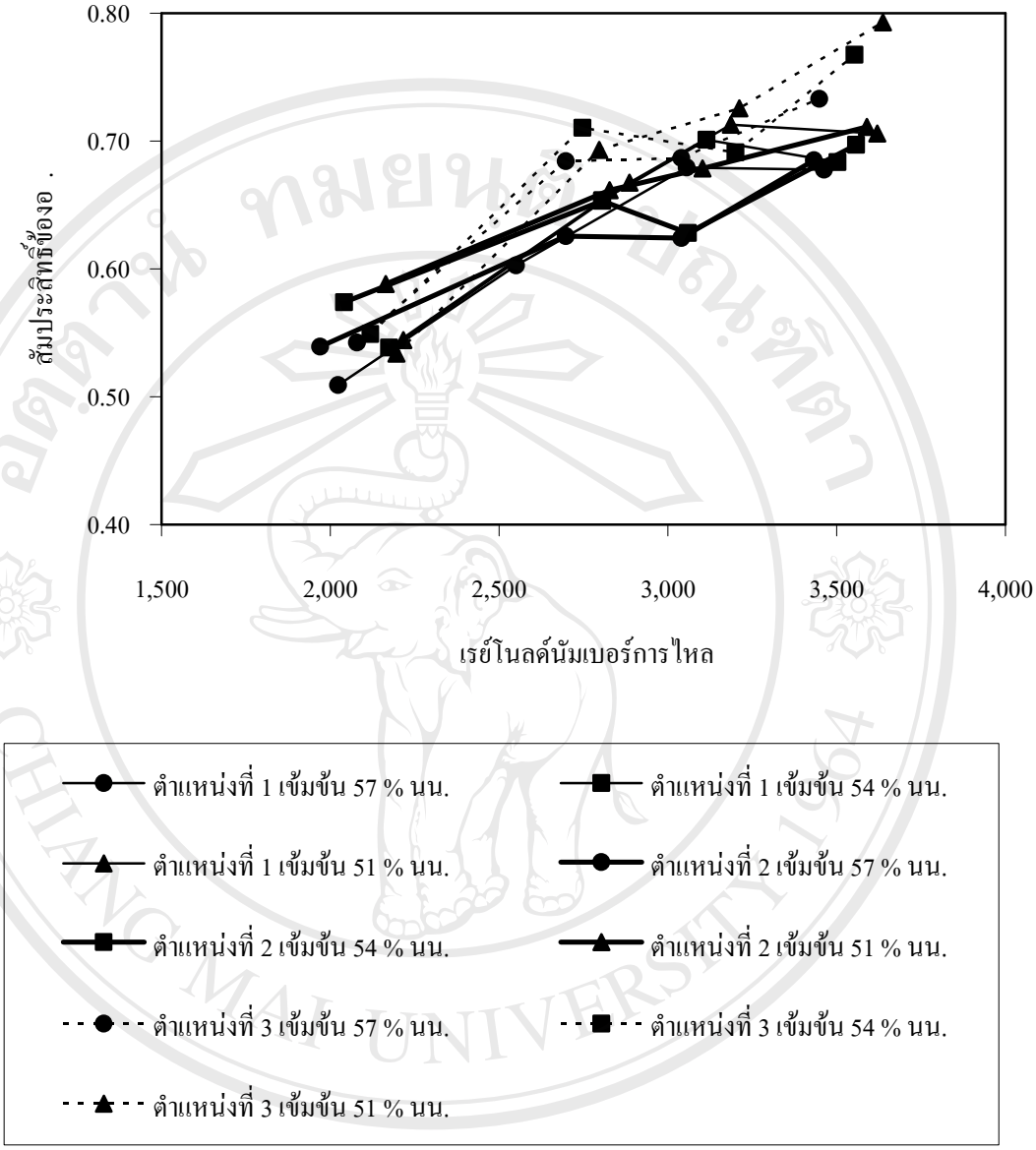
รูป ข.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความดันแตกต่าง และค่าอัตราการไหล แยกตามตำแหน่งข้องอ และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม ของข้องอที่มีจุดวัดความดัน ที่มุม 37.5 องศา



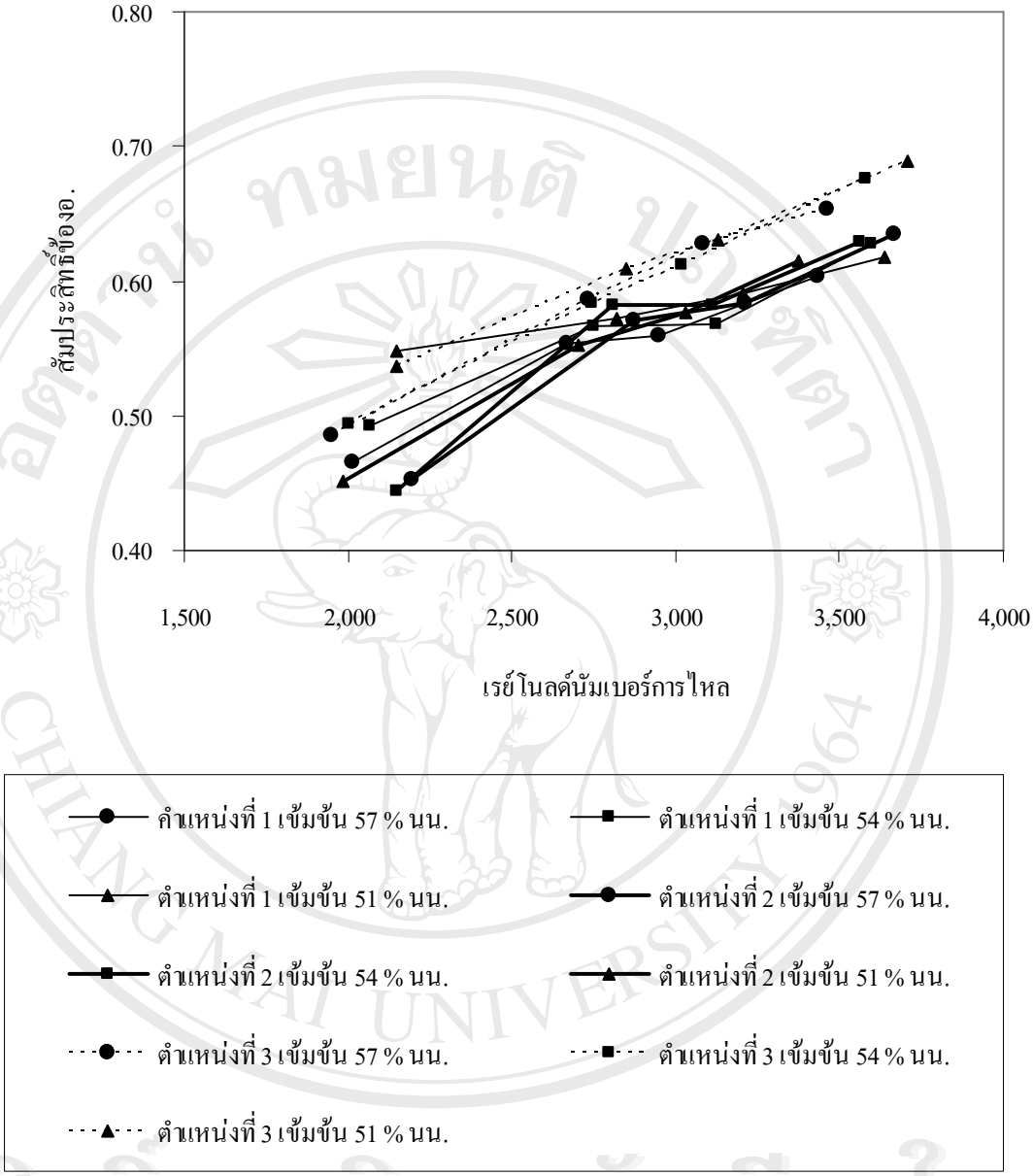
รูป ข.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ข้องอ และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์การไหล แยกตามตำแหน่งข้องอ และจุดวัดความดัน ที่ความเข้มข้นน้ำยิปซัม 54 เปอร์เซ็นต์



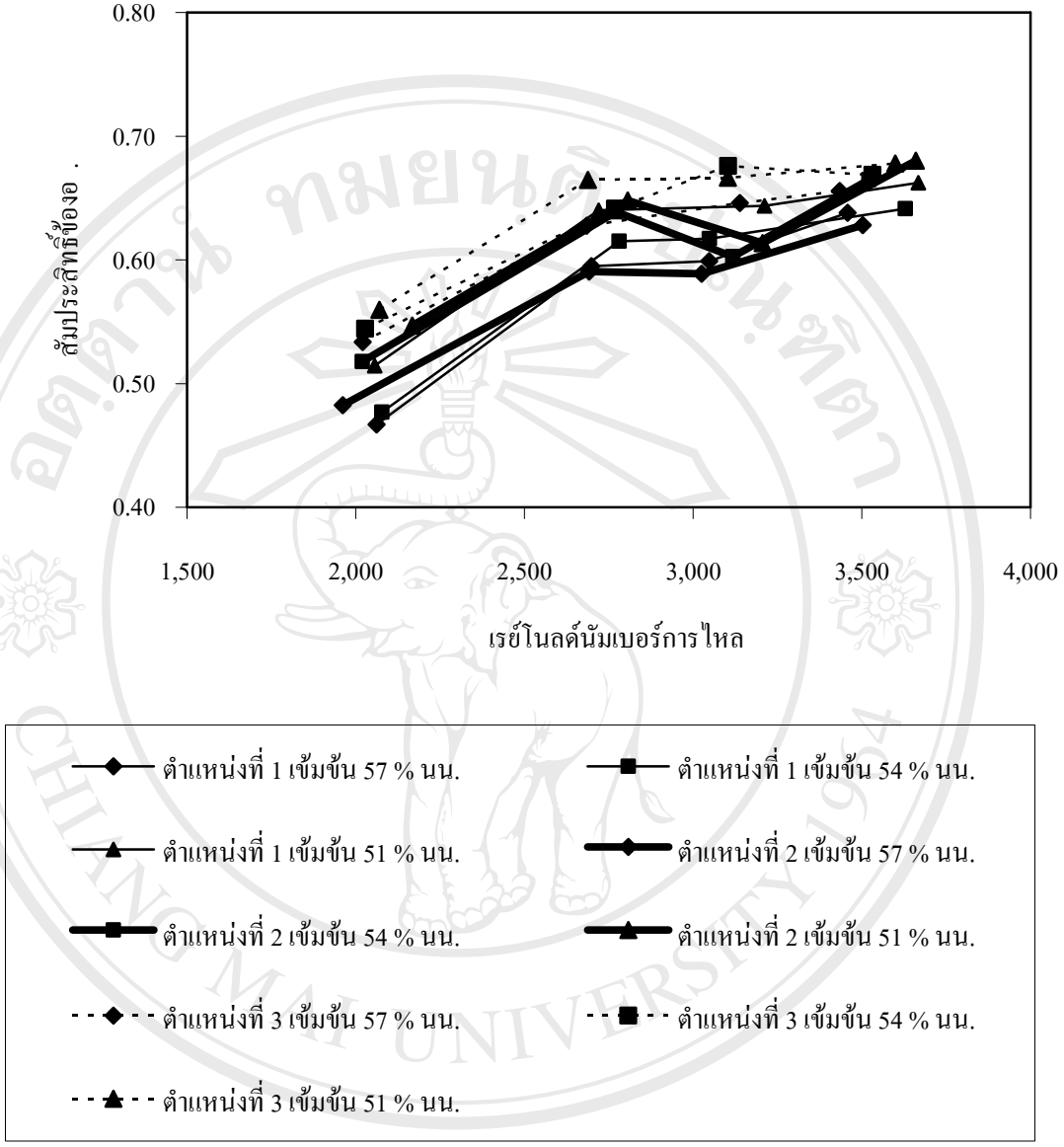
รูป ข.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ข้องอ และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์การไหล แยกตามตำแหน่งข้องอ และจุดวัดความดัน ที่ความเข้มข้นน้ำยิปซัม 57 เปอร์เซ็นต์



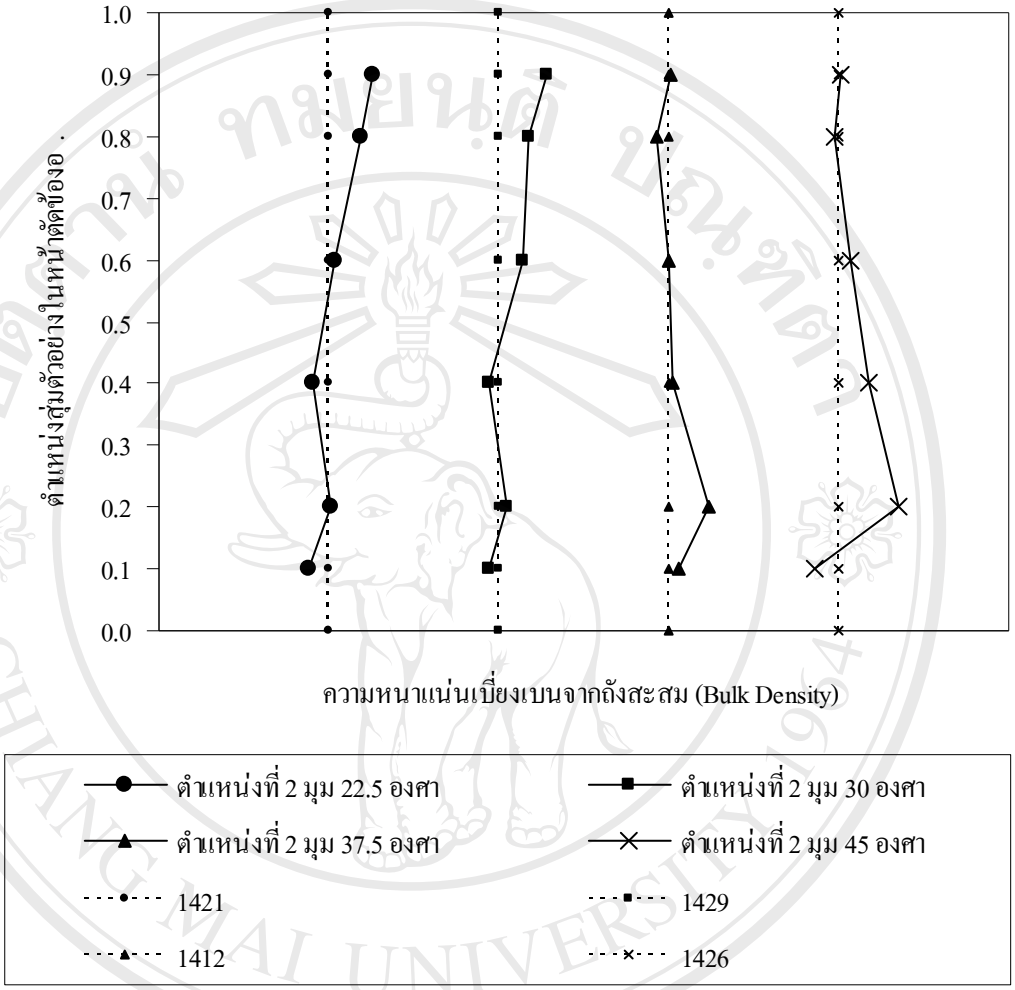
รูป ข.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ข้องอ และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์การไหล แยกตามตำแหน่งข้องอ และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม ของข้องอที่มีจุดวัดความดันที่มุม 22.5 องศา



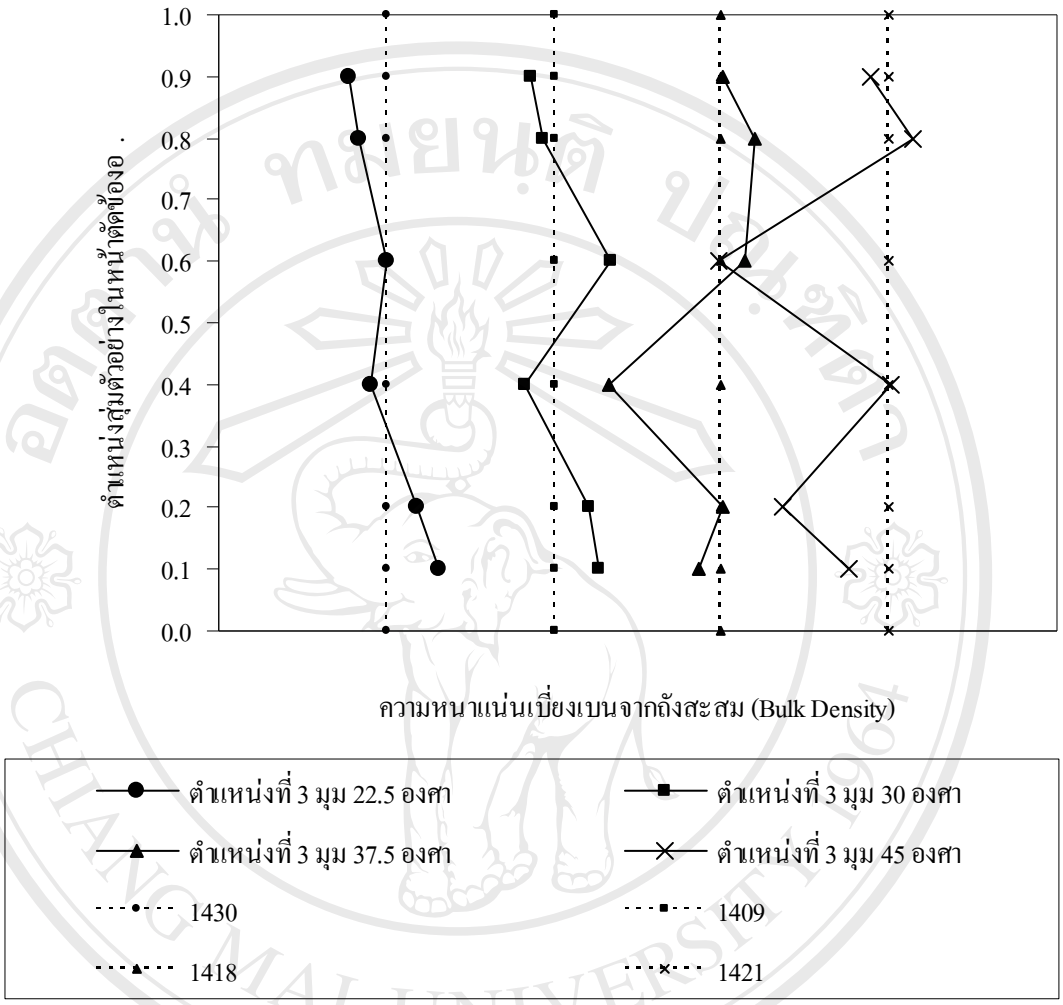
รูป ข.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ข้องอ และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์การไหล แยกตามตำแหน่งข้องอ และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม ของข้องอที่มีจุดวัดความดันที่มุม30 องศา



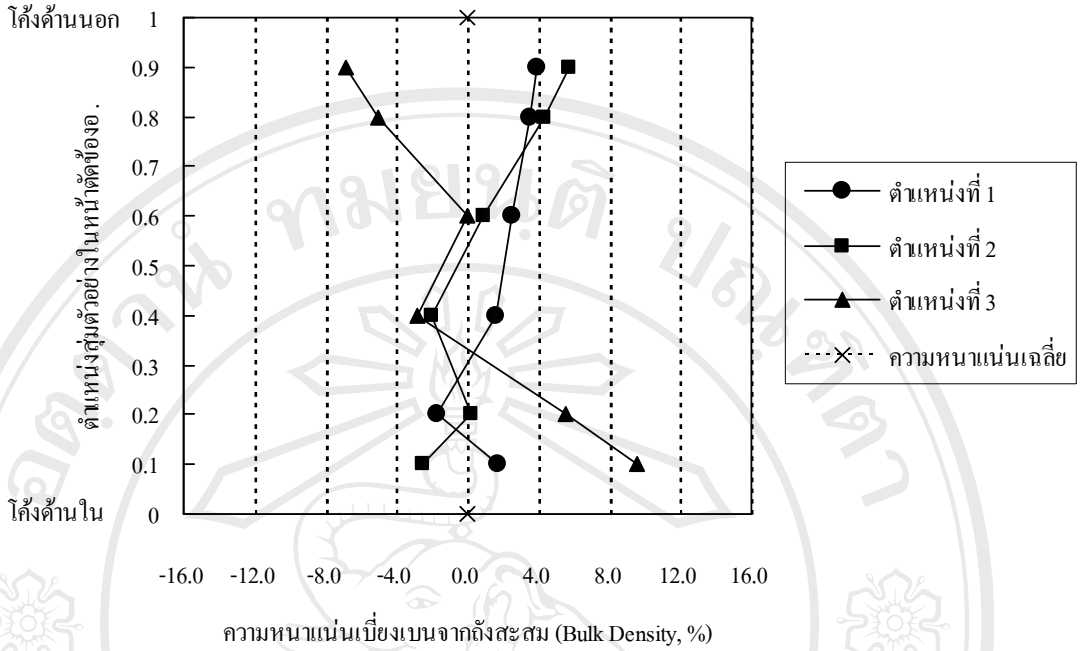
รูป ข.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์ข้องอ และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์การไหล แยกตามตำแหน่งข้องอ และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม ของข้องอที่มีจุดวัดความดันที่มุม 37.5 องศา



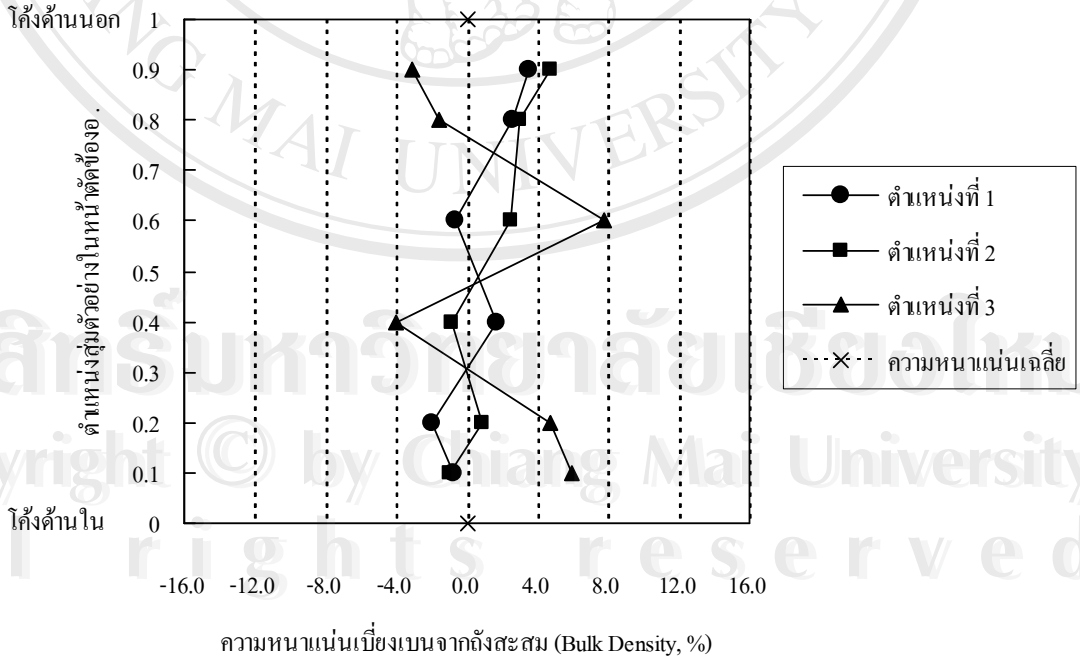
รูป ข.9 แสดงการกระจายความหนาแน่น ในแกนจุดวัดความดัน ของข้องอตำแหน่งที่ 2



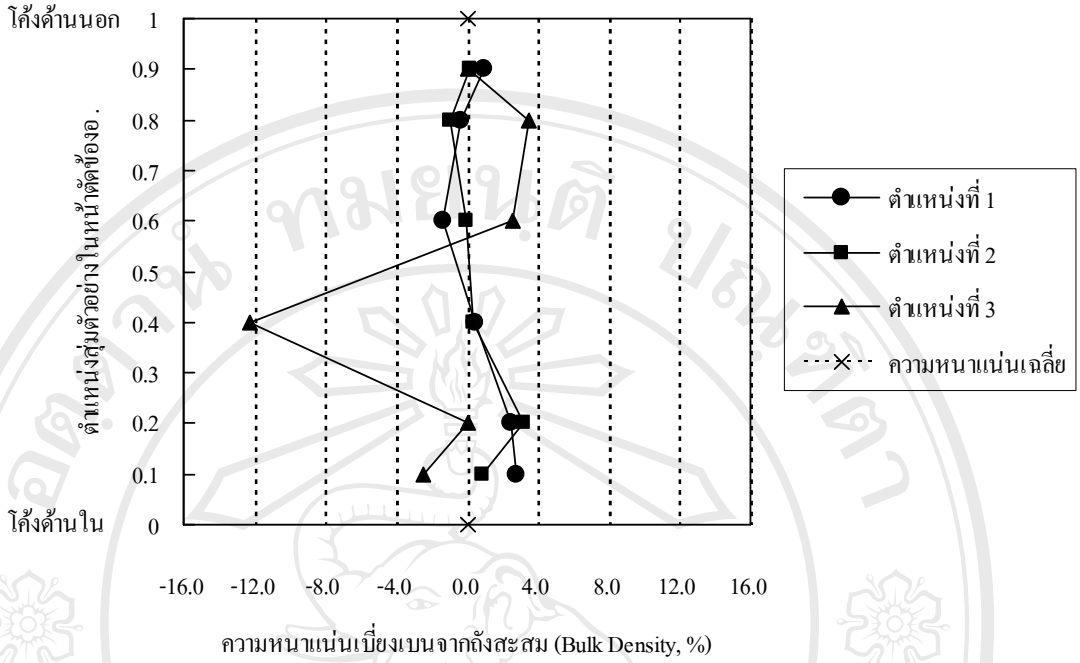
รูป ข.10 แสดงการกระจายความหนาแน่น ในแกนจุดวัดความดัน ของข้องอตำแหน่งที่ 3



รูป ข.11 แสดงการกระจายความหนาแน่น ในแกนจุดวัดความดัน ที่มุม 22.5 องศา



รูป ข.12 แสดงการกระจายความหนาแน่น ในแกนจุดวัดความดัน ที่มุม 30 องศา



รูป ข.13 แสดงการกระจายความหนาแน่น ในแกนจุดวัดความดัน ที่มุม 37.5 องศา

ภาคผนวก ค

สรุปสาระจากเอกสารมาตรฐาน ที่นำมาใช้ในงานวิจัย

สำหรับมาตรฐานต่างๆ ที่นำมาใช้ในงานวิจัย ได้แก่ มาตรฐาน ISO 5167 ค.ศ. 2003 เรื่อง การวัดการไหล ด้วยอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง ที่สอดเข้าไปในหน้าตัดทรงกลม มีการไหลเต็มหน้าตัด, มาตรฐาน ISO 2186 ค.ศ. 1973 เรื่อง การต่อพ่วงอุปกรณ์ เพื่อการส่งผ่านสัญญาณความดัน ระหว่างองค์ประกอบหลัก (Primary) และองค์ประกอบที่สอง (Secondary) มาตรฐาน ISO 8316 ค.ศ. 1987 เรื่อง การวัดของไหลในท่อปิด ด้วยวิธีสะสมของไหลในภาชนะที่รู้ปริมาตร มาตรฐาน ISO/TR 5168 ค.ศ. 1998 เรื่อง การประเมินความไม่แน่นอน ในการวัดการไหล วิธีการตามมาตรฐานประยุกต์ KRC Application Pursuant to German and International สำหรับการหาค่าความหนาแน่น ของน้ำยิปซัมสังเคราะห์ และมาตรฐาน DIN 16965 Part 1, 16965 Part 4 และ 16966 Part 2 สำหรับการผลิตท่อ และอุปกรณ์ในระบบท่อ ด้วยวัสดุ Fiber Reinforced Plastic โดยมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ดังนี้

1. มาตรฐาน ISO 5167 ค.ศ. 2003

ให้คำนิยาม และหลักการ ของการวัดการไหล ด้วยอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง ที่สอดเข้าไปในหน้าตัดทรงกลม มีการไหลเต็มหน้าตัด ได้แก่

1.1 อุปกรณ์สำหรับวัดความดันแตกต่าง ที่มีของไหล ไหลผ่านจุดวัดความดัน ด้วยความเร็วต่ำกว่าเสียง ตลอดหน้าตัดที่วัดความดัน โดยของไหลที่พิจารณามีสถานะเดียว และไหลแบบไม่กระเพื่อม

1.2 จุดวัดความดันที่ผนัง เป็นรูหรือช่องทรงกลม เจาะทะลุผ่านผนัง จนผิวด้านในของรูต่อเนื่องกับ ผิวของช่องทางการไหล โดยไม่มีส่วนยื่นหรือเว้า ที่จะส่งผลกระทบต่อรูปแบบการไหล ผิวภายในรูต้องเรียบ สำหรับจุดวัดค่าความดันแตกต่าง ต้องมีขนาดเท่ากันทั้ง 2 จุด แนวของรูทั้ง 2 ต้องตั้งฉากกับแนวแกนท่อ ขนาดของรูต้องไม่เล็กกว่า 0.13 เท่า ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ แต่ต้องไม่ใหญ่กว่า 13 มม.

1.3 อัตราการไหลเชิงปริมาตร เป็นสัดส่วนปริมาตรของไหล ขณะผ่านเครื่องวัด ต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยอ้างอิงสภาวะความดัน และอุณหภูมิ

1.4 ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ เป็นตัวแปรไร้หน่วย แสดงค่าสัดส่วนระหว่าง แรงเฉื่อยต่อแรงหนืด

1.5 ค่าสัมประสิทธิ์การจ่าย ของของไหลที่ไม่ยุบตัว เป็นสัดส่วนของอัตราการไหลที่แท้จริง ต่ออัตราการไหลทางทฤษฎี จากการสอบเทียบเครื่องวัดการไหลมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์จะขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ เพียงอย่างเดียว โดยสมการของค่าสัมประสิทธิ์ จะได้มาจากการทดลอง และความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์ ลดลงได้ด้วยการสอบเทียบ โดยการทดลองที่เหมาะสม

1.6 หลักการของการวัดการไหล ตามมาตรฐาน ขึ้นอยู่กับการติดตั้งเครื่องวัดในระบบท่อ ที่มีของไหล ไหลเต็มท่อ การติดตั้งเครื่องวัด จะทำให้เกิดความดันแตกต่างคร่อมเครื่องวัด

1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธ์การจ่าย ของเครื่องวัด กับตัวแปรอื่นๆ จะได้มาจากข้อมูลผลการทดลอง

1.8 การตรวจวัดค่าอุณหภูมิของไหล ควรวัดในตำแหน่งด้านหลังเครื่องวัดการไหล โดยมีระยะท่อตรงห่างจากเครื่องมือวัดอย่างน้อย 5 เท่า ของขนาดท่อ

1.9 ข้อกำหนด การติดตั้งเครื่องมือวัดการไหล แบบความดันแตกต่าง

1.9.1 เครื่องมือวัดต้องต่อ กับท่อทรงกระบอกตรง ที่มีขนาดหน้าตัดคงที่ มีระยะเพียงพอ ต่อการติดตั้ง โดยไม่มีการขัดขวางทางไหล ตามที่ระบุในมาตรฐาน ISO 5167-2: 2003, ISO 5167-3: 2003 หรือ ISO 5167-4: 2003 และเบี่ยงเบนจากแนวเส้นตรง ไม่เกิน 0.4 % ตลอดช่วงความยาวท่อ

1.9.2 สภาพภายในท่อต้องสะอาด และมีค่าความหยาบผิวอยู่ภายในช่วงที่กำหนด ในเอกสารมาตรฐาน

1.9.3 ต้องจัดให้มีรูระบายของเหลวและอากาศ ในระบบท่อ เพื่อกำจัดตะกอน หรือของไหลตกค้าง โดยรูระบายฯ ไม่ควรติดตั้งใกล้เครื่องวัด รูเหล่านี้ควรมีขนาดต่ำกว่า 0.08 เท่า ของขนาดหน้าตัดท่อ

1.9.4 จำเป็นต้องหุ้มฉนวนเครื่องมือวัด หากอุณหภูมิของ ของไหลและบรรยากาศแตกต่างกันมาก ในกรณีที่ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ กระทบต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าความหนาแน่นทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการวัด

2. มาตรฐาน ISO 8316 ค.ศ. 1987

เป็นมาตรฐานที่นำมาใช้ในการสร้าง เครื่องมือหาค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร มีความแม่นยำสูง โดยมีความคลาดเคลื่อน ± 0.1 ถึง ± 0.2 % ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และมีองค์ประกอบ ที่มีอิทธิพลต่อความแม่นยำของวิธีการวัด ดังนี้

2.1 ภายในวงจรการไหล ต้องไม่มีการรั่วของ ของเหลว

2.2 ของเหลวที่ไหลภายในท่อ ต้องไหลเต็มพื้นที่หน้าตัด ที่ทำการวัด

2.3 ต้องใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตรและระดับในภาชนะ ในการคำนวณ

2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดระดับ และนับเวลาต้องมีความแม่นยำ

2.5 การเบี่ยงทิศทางการไหลใช้เวลาสั้น เมื่อเทียบกับเวลาที่สะสมของเหลวในภาชนะ

2.6 อุณหภูมิของ ของไหลต้องเท่ากับอุณหภูมิของ ของเหลวในภาชนะ

จากองค์ประกอบดังกล่าว จึงจำเป็นต้องออกแบบ สร้างและใช้เครื่องมือประกอบต่างๆ ดังนี้

2.6.1 ภาชนะ (Volumetric Tank) ต้องทำจากภาชนะที่แข็งแรง ไม่รั่วซึม รักษารูปทรงได้ ผนังภาชนะต้องเรียบ เพื่อหลีกเลี่ยงการตกค้าง และมีการระบายของเหลวออกจากภาชนะอย่างสมบูรณ์ ภาชนะควรมีขนาดใหญ่ รองรับการเปลี่ยนแปลงระดับอย่างน้อย 1 ม. ใช้เวลาสะสมปริมาตรของเหลว อย่างน้อย 30 วินาที ณ ค่าอัตราการไหลสูงสุด เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของระดับและเวลา

2.6.2 ที่วัดระดับ (Level Measuring) ควรเป็นแบบตำแหน่ง (Point) หรือแบบลูกลอย (Float) ที่มีสเกลบอกระดับ (Fixed Graduated Scale) ติดข้างกระจก หรือผนังใส และต้องติดตั้งตัวลดการกระเพื่อมของ ของเหลวในภาชนะ

2.6.3 อุปกรณ์เบี่ยงทิศทางการไหล (Diverter) ควรใช้อุปกรณ์สำหรับเบี่ยงทิศทางการไหล ที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ โดยใช้เวลาน้อยกว่า 1 วินาที

2.6.4 อุปกรณ์นับเวลา (Timer) ควรใช้นาฬิกาจับเวลา อิเลคทรอนิคส์ ที่แสดงค่าได้ละเอียดถึง 0.01 วินาที

ในการใช้งาน ควรจัดทำกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตรและระดับ (Volume-Level Chart) เพื่อความสะดวกในการใช้งาน เนื่องจาก เป็นวิธีที่มีความแม่นยำสูง และไม่ได้รับผลกระทบจากขนาดทางกายภาพของภาชนะ

2.7 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน ในการวัดอัตราการไหล ด้วยวิธีเชิงปริมาตร ได้แก่

ก. ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic Errors) ประกอบด้วย

1.1 ความคลาดเคลื่อนของภาชนะ ที่เกิดจากความบกพร่อง ในการหาความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาตร และระดับของเหลว มีค่าเท่ากับ $\sqrt{2}\,(e_S)_V$

1.2 ความคลาดเคลื่อนของสเกลบอกระดับ ที่เกิดจากความบกพร่องของสเกล มีค่าเท่ากับ $\sqrt{2}\,(e_S)_Z$

1.3 ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์จับเวลา ซึ่งเกิดจากการสอบเทียบอุปกรณ์จับเวลา โดยเครื่องมือที่มีความละเอียด 1 มิลลิวินาที จะมีค่าเท่ากับ 0.01 เปอร์เซ็นต์

1.4 ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์เบี่ยงทิศทางการไหล จะมีค่าเท่ากับ 0.01 เปอร์เซ็นต์

ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ E_S ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ คำนวณจากสมการ (ค.1)

$$E_S = \sqrt{2\left[\frac{(e_S)_V}{V}\right]^2 + 2\left[\frac{(e_S)_Z}{V}\frac{\partial V}{\partial Z}\right]^2 + \left[\frac{(e_S)_T}{T}\right]^2 + \left[\frac{(e_S)_P}{T}\right]^2} \quad \ldots(\text{ค.1})$$

ข. ความคลาดเคลื่อนเชิงสุ่ม (Random Errors)

a. ความคลาดเคลื่อนในการหาปริมาตรสะสม เกิดจากการสอบเทียบภาชนะ มีค่าเท่ากับ $\sqrt{2}\,(e_R)_V$

b. ความคลาดเคลื่อน ของระบบเบี่ยงทิศทางการไหล เกิดจากความสม่ำเสมอในการเคลื่อนที่ ของอุปกรณ์เบี่ยงทิศทางการไหล มีค่าเท่ากับ $\sqrt{2}\,(e_R)_P$

ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงสุ่ม E_R ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % คำนวณจากสมการ (ค.2)

$$E_R = \sqrt{2\left[\frac{(e_R)_V}{V}\right]^2 + \left[\frac{(e_R)_P}{T}\right]^2} \quad \ldots\ldots\ldots(\text{ค.2})$$

3. มาตรฐาน ISO 2186 ค.ศ. 1973

เป็นมาตรฐาน ที่นำมาใช้ประกอบการออกแบบ สร้างเครื่องวัดการไหลแบบข้องอ ได้แก่ จุดวัดความดัน และการใช้อุปกรณ์ต่อพ่วง ได้แก่ ประตูน้ำ ห้องระบายอากาศ ห้องระบายตะกอนตกค้าง และตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดความดัน เทียบกับระบบท่อ

3.1 จุดวัดความดัน เป็นตำแหน่งของจุดต่อบนผนังท่อทรงกลม เพื่อนำสัญญาณความดัน กรณีที่ของเหลวมีองค์ประกอบของ ของแข็งปนอยู่ในปริมาณสูง กำหนดให้จุดวัดความดัน อยู่

เหนือเส้นแนวแกนท่อ สำหรับจุดวัดความดัน ที่อยู่บนท่อในแนวนอน ส่วนท่อในแนวดิ่ง มักจะไม่มีปัญหาเรื่องของจุดวัดความดัน ผิวด้านในท่อที่ต่อกับจุดวัดความดันต้องเรียบ และขอบต้องเรียบเสมอกัน ขนาดของรูจุดวัดความดันมีขนาดตามตารางที่หนึ่ง หากมีความเสี่ยงสูง ที่จะมีของเหลวหรือของแข็งอุดตัน ให้ใช้จุดวัดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ไม่ควรเกิน 0.1 เท่า ของขนาดท่อ

3.2 วาล์ว จำเป็นต้องติดตั้งวาล์ว เพื่อแยกระบบการวัดออกจากระบบท่อหลัก โดยให้ติดตั้งก่อนถึงอุปกรณ์หลัก (Primary Element) ในกรณีที่มีห้องกลั่นตัว วาล์วควรจะอยู่ก่อนเข้าห้องกลั่นตัว โดยสามารถเปลี่ยนแปลงให้เหมาะกับการใช้งาน ชนิดของวาล์วที่นำมาใช้ ต้องไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสัญญาณความดัน วาล์วควรมีขนาดช่องเปิดใหญ่กว่าขนาดรูวัดความดัน

3.3 ห้องระบายอากาศ สำหรับดักและระบายอากาศ ที่เกิดขึ้นภายในช่องความดันระหว่างรูวัดความดันและอุปกรณ์หลัก แนวท่อความดันควรมีความชันมากๆ ห้องระบายอากาศควรอยู่ในจุดที่สูงสุดของระบบท่อนำสัญญาณความดัน และมีวาล์วสำหรับระบายอากาศ ความจุของห้องระบายอากาศ สามารถปรับได้ตามคุณสมบัติของการติดตั้ง

3.4 ห้องดักตะกอน ใช้สำหรับดักตะกอนของแข็ง ที่สามารถอุดตันในท่อนำสัญญาณความดัน และจำเป็นต้องติดตั้ง ในกรณีที่อุปกรณ์ที่ต่อพ่วง อยู่ต่ำกว่าแนวของท่อหลัก ขนาดรูของท่อที่ต่อเข้าห้องดักตะกอน ควรมีขนาดใหญ่เพียงพอ เพื่อหลีกเลี่ยงการอุดตันในท่อ และการหน่วงของสัญญาณความดันเข้าสู่อุปกรณ์หลัก ห้องดักตะกอนควรติดตั้งที่จุดต่ำสุดของระบบท่อ แต่ถ้าอุปกรณ์ที่ต่อพ่วงอยู่สูงกว่าอุปกรณ์หลัก ให้รวมห้องดักตะกอนกับห้องระบายอากาศ การออกแบบห้องดักตะกอน ควรติดตั้งวาล์วระบายแบบช่องเปิดเต็มที่ เพื่อให้ง่ายต่อการระบายตะกอน และการทำความสะอาด ขนาดของห้องดักตะกอน ควรมีขนาดใหญ่ที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของตะกอน และความถี่ในการทำความสะอาด

3.5 ห้องกันรั่วและระบบทำความสะอาด ใช้ในกรณีที่ต้องการแยกของเหลวในระบบเครื่องมือวัด ออกจากของเหลวในระบบท่อที่จะทำการวัดความดัน มักใช้ในกรณีที่ของเหลวมีความสกปรก มีความหนืดสูง หรือเกิดการตกตะกอน โดยของเหลวที่ทำหน้าที่กันรั่ว ต้องไม่ผสมกับของเหลวในระบบ ควรมีความหนาแน่นต่างกัน และมีความเสถียรที่หน้าสัมผัสเพียงพอ ห้องกันรั่วทั้งสองด้าน ควรติดตั้งในระดับเดียวกัน และใกล้กับรูของจุดวัดความดันให้มากที่สุด ในกรณีที่ของเหลวมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ไม่เหมาะสมกับของเหลวที่ใช้กันรั่ว จำเป็นต้องใช้ตัวกั้นห้อง เช่น ไดอะแฟรม หรือ เบลโลว์ โดยคุณสมบัติของห้องกันรั่ว ต้องมีความเค้นและการขจัดเหมือนกัน ระบบทำความสะอาด (Purge System) มีไว้เพื่อป้องกันความสกปรก และของเหลวที่มีพิษ ผ่านเข้ามาในท่อนำสัญญาณความดัน และอุปกรณ์ต่อพ่วง ความถี่ในการทำความสะอาด จะ

ขึ้นอยู่กับ ความอยู่ตัวของการไหล ชนิดของอุปกรณ์ต่อพ่วง และ ความจุรวมของท่อความดัน การนำของเหลวเข้าไปชะล้างตะกอน ต้องใช้ของเหลวที่สะอาด และมีความดันเหมาะสมเพียงพอ

3.6 ท่อนำสัญญาณความดัน อุปกรณ์หลักควรติดตั้งใกล้เครื่องมือวัด เพราะความเร็วของการตอบสนองจะลดลง ถ้าท่อนำสัญญาณมีความยาวมาก โดยระยะทางในการส่งสัญญาณของท่อความดัน ไม่ควรยาวกว่า 16 เมตร ซึ่งเป็นขีดจำกัดของการส่งสัญญาณไฟฟ้า ท่อความดันทั้งสองอัน ควรติดตั้งอยู่ใกล้กัน เพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อน ของความดันแตกต่าง ที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิที่ต่างกัน รูของท่อนำสัญญาณความดัน ควรมีขนาดเท่ากัน และไม่ควรมีขนาดเล็กกว่า 6 มม. และไม่ควรใหญ่กว่า 10 มม. ท่อนำสัญญาณความดันควรมีความลาดเอียงไม่น้อยกว่า 1 ใน 12 เพื่อให้อากาศพุ่งออกไปที่วาล์วระบาย และตะกอนของแข็ง ตกลงสู่ห้องดักตะกอน ท่อควรมีความชันมากขึ้น ถ้าของเหลวมีความหนืดมากกว่าน้ำ

3.7 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดความดัน เทียบกับระบบท่อ ในกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง อยู่ที่ระดับต่างกันจะต้องทำการปรับแก้ เพื่อให้ค่าความดันแตกต่างที่อ่านได้ อยู่ที่แนวศูนย์กลางของท่อ

4. มาตรฐาน ISO/TR 5168 ค.ศ. 1998

นำมาใช้ในการประเมินความไม่แน่นอน จากผลการทดลอง โดยแสดงรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณค่าความไม่แน่นอน จากแหล่งความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ และเชิงสุ่ม และการรวมทั้ง 2 องค์ประกอบ เป็นค่าความไม่แน่นอนของผลการทดลอง โดยสมมติว่า มีการควบคุมกระบวนการ ในการวัดเป็นอย่างดี และมีการสอบเทียบ โดยกำหนดให้

4.1 ความคลาดเคลื่อนเชิงสุ่ม เกิดจากอิทธิพลของตัวแปรอิสระ และจำนวน ซึ่งขัดขวางมิให้ได้รับค่าที่เหมือนกัน จากสภาวะเดียวกัน ซึ่งสามารถวัดได้ โดยใช้ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, s) ถ้ามีค่านี้มาก แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายจากค่าเฉลี่ยมาก โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน คำนวณจากสมการ (ค.3)

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{N-1}} \qquad \text{..... (ค.3)}$$

เมื่อค่า N คือ จำนวนข้อมูลที่ได้ จากการทำซ้ำๆ ที่สภาวะเดียวกัน

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของการวัด ที่สภาวะเดียวกัน

ถ้าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ ค่าที่แท้จริงจะอยู่ในช่วง $\bar{x} \pm t_{95} \frac{s}{\sqrt{N}}$ ถ้าข้อมูลมีจำนวนน้อยกว่า 30 ความไม่แน่นอนเชิงสุ่มของค่าเฉลี่ย คือ $t_{95} \frac{s}{\sqrt{N}}$ แต่ ถ้าข้อมูลมีจำนวนมากกว่า 30 ความไม่แน่นอนเชิงสุ่มของค่าเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ $2s$ ค่าความไม่แน่นอนเชิงสุ่ม สามารถลดลงได้โดยทำการทดลองจำนวนมากที่สุด เท่าที่จะทำได้

4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ เป็นค่าคงที่ตลอดช่วงการทดสอบเท่านั้น และทำได้เพียงการวัดเทียบกับค่าที่แท้จริง ที่ได้จากการสอบเทียบ มักเกิดจาก การสอบเทียบที่ไม่สมบูรณ์ การติดตั้งเครื่องมือวัดที่ไม่สมบูรณ์ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวิธีการ และเกิดจากคน

4.3 การรวมองค์ประกอบ ของค่าความไม่แน่นอน หลังจากระบุค่าความคลาดเคลื่อนจากแต่ละองค์ประกอบแล้ว จะต้องรวมค่าความไม่แน่นอนเชิงระบบ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละองค์ประกอบแยกจากกัน เมื่อได้เป็นค่าความไม่แน่นอนเชิงระบบรวม และเชิงสุ่มรวมแล้ว การนำค่ามารวมกัน เป็นค่าความไม่แน่นอนรวมค่าเดียว ให้ใช้วิธี ผลรวมรากที่สอง (root-sum-square)

4.4 การแสดงผล ควรอยู่ในรูปแบบของรายงานสรุป ที่ประกอบด้วย ข้อมูลผลการทดลอง ค่าความไม่แน่นอนเชิงระบบ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ระดับความเชื่อมั่น และค่าความไม่แน่นอนรวม สมการที่ใช้ในการคำนวณต้องระบุวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์

5. มาตรฐาน KRC Application Pursuant to German and International

เป็นมาตรฐานประยุกต์ ใช้สำหรับ การหาค่าความหนาแน่น ของน้ำยิปซัมสังเคราะห์ ในระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยในมาตรฐานระบุ หลักการ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ ขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง การวัดค่าความหนาแน่น และสมการที่ใช้ในการคำนวณรวมทั้งค่าปัจจัยปรับแก้ตามค่าอุณหภูมิ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

5.1 จากหลักการ ต้องทำการหาค่าความหนาแน่นของ ตัวอย่างน้ำยิปซัม ภายในเวลา 15 – 20 นาที หลังจากเก็บตัวอย่างน้ำยิปซัม เนื่องจาก ภายหลังการเก็บตัวอย่าง น้ำยิปซัมจะเย็นลงอนุภาคของแข็งจะตกตะกอน และเกิดการแยกชั้นในที่สุด

5.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง และหาค่าความหนาแน่น ประกอบด้วย

5.2.1 ภาชนะเก็บตัวอย่างมีฝาปิด ที่แห้งและสะอาด

5.2.2 ภาชนะรองรับขวดเก็บตัวอย่าง

5.2.3 ถุงมือยาง

5.2.4 รองเท้าบู๊ตยาง

5.2.5 ภาชนะใสทรงสูง (Volumetric Flask) มีสเกลบอกปริมาตร ความจุ 1,000 มิลลิลิตร ที่แห้งและสะอาด

5.2.6 เครื่องชั่งน้ำหนัก ที่มีความละเอียด 0.01 กรัม

5.3 ขั้นตอนในการเก็บตัวอย่างน้ำยิปซัม ประกอบด้วย

5.3.1 เตรียมภาชนะเก็บตัวอย่าง ที่แห้งและสะอาด ติดฉลากไว้ การเก็บตัวอย่างต้องสวมถุงมือทุกครั้ง

5.3.2 ค่อยๆ เปิดวาล์วเก็บตัวอย่าง เพื่อป้องกันน้ำยิปซัมไหลทะลัก พุ่งกระเซ็น

5.3.3 เปิดวาล์วเพิ่มขึ้นจนเปิดเต็มที่ เพื่อให้น้ำยิปซัมไหลเต็มท่อ ปล่อยทิ้งประมาณ 1 นาที

5.3.4 เอียงภาชนะเก็บตัวอย่าง ให้น้ำยิปซัมไหลเข้าภาชนะ โดยไม่กระฉอกจากปากขวด

5.3.5 เก็บตัวอย่าง ให้ได้ประมาณ 3 ใน 4 ส่วนของภาชนะ เพื่อให้มีพื้นที่ในการเขย่า

5.3.6 เมื่อได้ตัวอย่างน้ำยิปซัมแล้ว ให้รีบปิดฝาภาชนะให้สนิท ทันที

5.4 การหาค่าความหนาแน่น ทำความสะอาดภาชนะใสทรงสูง และนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าน้ำหนักของภาชนะเปล่า เอียงภาชนะเก็บตัวอย่าง ให้น้ำยิปซัมไหลลงมาในภาชนะทรงสูงให้หมดภายในครั้งเดียว บันทึกค่าน้ำหนักของภาชนะกับตัวอย่างน้ำยิปซัม บันทึกค่าปริมาตรจากสเกลข้างภาชนะทรงสูง อ่านค่าอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการ ถ้าอุณหภูมิต่างจาก 20°C ทำการคำนวณค่าปัจจัยปรับแก้จากสมการ (ค.4)

$$Correction\_Factor(g/l) = \left(1 - 0.3825x10^{-3}\, x\left(T^{0}C - 20^{0}C\right)\right) \quad \ldots\ldots(\text{ค.4})$$

และคำนวณค่าความหนาแน่นจากสมการ (ค.5)

$$Density\left(kg/m^{3}\right) = \frac{\left(weight\_of\_flask + suspension(g)\right) - \left(empty\_flask(g)\right)}{Correction\_Factor(g/l)xVolume(ml)} \quad \ldots\ldots\ldots(\text{ค.5})$$

5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเชิงน้ำหนัก เป็นไปตามสมการ (ค.6)

$$\rho_m = \frac{100}{C_w/\rho_S + (100 - C_w)/\rho_L} \qquad \text{..... (ค.6)}$$

เมื่อค่า ρ_m คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำยิปซัมสังเคราะห์ จากสมการ (ค.5) หน่วย กก.ต่อ ลบ.ม.

ρ_S คือ ค่าความหนาแน่นของอนุภาคยิปซัมสังเคราะห์ หน่วย กก.ต่อ ลบ.ม.

ρ_L คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำ ที่อุณหภูมิ 60°C หน่วย กก.ต่อ ลบ.ม.

C_w คือ เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเชิงน้ำหนักของยิปซัมสังเคราะห์ หน่วย เปอร์เซ็นต์

5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเชิงปริมาตรกับ ความหนาแน่น และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเชิงน้ำหนัก เป็นไปตามสมการ (ค.7)

$$C_v = \frac{C_w \rho_m}{\rho_S} = \frac{100 C_w/\rho_S}{C_w/\rho_S + (100 - C_w)/\rho_L} \qquad \text{..... (ค.7)}$$

เมื่อค่า C_v คือ เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นเชิงปริมาตรของยิปซัมสังเคราะห์ หน่วย เปอร์เซ็นต์

ภาคผนวก ง

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ คุณสมบัติของน้ำยิปซัม ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของ ของแข็ง

MTEC
National Metal and Materials Technology Center

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
114 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง
จังหวัดปทุมธานี 12120
โทรศัพท์ : (662)564-6500 โทรสาร : (662)564-6501-5
www.mtec.or.th

National Metal and Materials Technology Center
National Science and Technology Development Agency
114 Paholyothin Rd., Klong 1, Klong Luang,
Pathumthani 12120 Thailand
Tel : (662)564-6500 Fax : (662)564-6501-5
www.mtec.or.th

MTEC NO. 428/45

6 มิถุนายน 2545

รายงานผลการวิเคราะห์

หัวข้อ	:	การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค การหาเฟสโครงสร้าง ค่าความหนาแน่น และร้อยละของน้ำส่วนเกินในสารแขวนลอยยิปซัม
ตัวอย่างจาก	:	คุณเฉลิมเกียรติ สวรรค์วงศ์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 299 หมู่ 2 ต.แม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง โทรศัพท์ : 054-252-922 โทรสาร : 054-252-923
ทดสอบโดย	:	งานบริการทางเทคนิค ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
วันที่รับตัวอย่าง	:	8 มีนาคม 2545
วันที่วิเคราะห์	:	11 และ 19 มีนาคม 2545
เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์	:	Mastersizer S (Malvern Instruments Limited) Ultrapycnometer 1000 (Quantachrome) XRD, PW3710 (Philip) เตาอบ (Memmert) , เครื่องชั่ง (Mettler Toledo)
สภาวะในการวิเคราะห์	:	Mastersizer S

He-Ne laser source, λ= 633 nm,
Beam Length = 2.40 mm.
Particle size range analysis = 0.05-880 μm.
Small volume dispersion unit (MS1)
Dispersing medium = distilled water
Treatment = stir (medium)
ค่าดัชนีหักเหของสารตัวอย่าง = 1.5295 (as default)
จำนวนครั้งในการทดลอง 3 ครั้ง

Ultrapycnometer 1000
Flow He gas 1 min, Cell unit = Large cell,
Temperature = 26.4-26.8 °C, จำนวนครั้งในการทดลอง 5 ครั้ง

XRD ส่งวิเคราะห์ทดสอบที่สถาบันวิจัยโลหะ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Current =30 mA, Voltage 40 kV, X-ray source = Cu
Step angle = 0.02, count time = 1.0

3. การวิเคราะห์หาเฟสโครงสร้างด้วยเทคนิค XRD

นำสารตัวอย่างมาอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C และมาบดเป็นผงละเอียดเพื่อวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิค XRD ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบที่เป็นไปได้ของสารตัวอย่าง

ลำดับที่	ตัวอย่าง	เฟสองค์ประกอบหลักที่เป็นไปได้
1	Gyp 1	Gypsum ($CaSO_4.2H_2O$)
2	Gyp 2	Gypsum ($CaSO_4.2H_2O$)

รูป ง.1 แสดงรายงานผลการวิเคราะห์ องค์ประกอบของยิปซัมสังเคราะห์ (ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2545)

```
==============================================================================
Philps Analytical X-Ray B.V.                          PC-APD,Diffraction  software

                Sample identification: No.3(428/45)
                     Data measured at: 26-Mar-2002 20:14:00

                  Diffractometer type: PW3710 BASED
                            Tube anode: Cu
              Generator tension [kV]: 40
              Generator current [mA]: 30
               Wavelength Alpha1 []: 1.54060
               Wavelength Alpha2 []: 1.54439
       Intensity ratio (alpha2/alpha1): 0.500
                   Divergence slit: 1½
                    Receiving slit: 0.1
                 Monochromator used: YES

                    Start angle [½2Õ]:   5.010
                      End angle [½2Õ]:  79.990
                      Step size [½2Õ]:   0.020
                   Maximum intensity: 4844.160
                   Time per step [s]:   1.000
                        Type of scan: CONTINUOUS

          Peak positions defined by: Minimum of 2nd derivative of peak
               Minimum peak tip width:    0.00
               Maximum peak tip width:    1.00
                     Peak base width:    2.00
             Minimum significance:       0.75
                   Number of peaks:        66
```

Angle [½2Õ]	d-value Á1 []	d-value Á2 []	Peak width [½2Õ]	Peak int [counts]	Back. int [counts]	Rel. int [%]	Signif.
9.555	9.2488	9.2715	0.060	41	35	0.8	1.08
11.685	7.5672	7.5858	0.120	4844	27	100.0	24.98
12.395	7.1353	7.1529	0.160	14	24	0.3	0.82
16.280	5.4403	5.4536	0.200	8	15	0.2	0.80
16.865	5.2529	5.2658	0.200	6	14	0.1	0.92
18.750	4.7288	4.7404	0.080	61	14	1.3	0.97
20.755	4.2763	4.2868	0.140	1840	13	38.0	22.60
23.395	3.7994	3.8087	0.120	955	12	19.7	12.60
24.795	3.5879	3.5967	0.240	6	11	0.1	0.86
26.230	3.3948	3.4031	0.120	14	10	0.3	0.98
26.485	3.3627	3.3710	0.480	7	10	0.2	1.61
28.115	3.1713	3.1791	0.100	24	10	0.5	0.87
29.115	3.0646	3.0722	0.080	2304	10	47.6	5.86
29.205	3.0554	3.0629	0.040	1246	10	25.7	5.44
29.430	3.0325	3.0400	0.060	81	10	1.7	0.95
31.115	2.8721	2.8791	0.160	441	10	9.1	11.94
32.085	2.7874	2.7943	0.140	190	10	3.9	5.14
33.355	2.6841	2.6907	0.120	199	10	4.1	3.72
34.550	2.5940	2.6003	0.140	102	9	2.1	3.92
35.390	2.5343	2.5405	0.100	41	9	0.8	1.19
35.970	2.4948	2.5009	0.080	557	9	11.5	3.84
36.610	2.4526	2.4586	0.100	108	9	2.2	1.93

รูป ง.2 แสดงเครื่องมือ วิธีการและผลการวิเคราะห์ องค์ประกอบของยิปซัมสังเคราะห์ ที่สถาบันวิจัยโลหะ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2545)

2. ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค ยิปซัม (ตัวอย่าง ส่งพร้อมกับการหาองค์ประกอบของ ของแข็ง)

ชิ้นงานตัวอย่าง

สารตัวอย่างเป็นสารแขวนลอยยิปซัมจำนวน 2 ตัวอย่าง คือ Gyp 1 และ Gyp 2 ซึ่งสารแขวนลอยนี้เป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ผลการวิเคราะห์ทดสอบ :

1. การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคสารตัวอย่างด้วยเครื่อง Mastersizer S

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. ตรวจวัด background ของเครื่องด้วยน้ำกลั่น ที่ยังไม่ได้ผสมสารตัวอย่างตัวอย่าง ใช้ Small sample dispersion unit (MS1)
2. เติมสารตัวอย่าง วัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค โดยทำการตรวจวิเคราะห์ซ้ำกัน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย
3. หาค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเชิงปริมาตร (Volume mean diameter) และเส้นผ่านศูนย์กลางแบบ 10, 50 and 90% less than or equal to D รวมทั้งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคสารตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของตัวอย่างสารตัวอย่าง จำนวน 2 ตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาค (D), ไมครอน จากการทดลองครั้งที่			ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, ไมครอน
	1	2	3	
1. Gyp 1				
Volume mean diameter	27.69	26.88	26.89	27.24 ± 0.62
10 volume % less than or equal to D	0.30	0.27	0.25	0.27 ± 0.03
50 volume % less than or equal to D	25.00	23.77	22.98	23.92 ± 1.02
90 volume % less than or equal to D	58.99	57.70	58.91	58.53 ± 0.72
2. Gyp 2				
Volume mean diameter	26.12	25.11	24.04	25.09 ± 1.04
10 volume % less than or equal to D	0.30	0.28	0.26	0.28 ± 0.02
50 volume % less than or equal to D	25.45	23.74	22.87	24.02 ± 1.31
90 volume % less than or equal to D	50.43	50.48	48.71	49.87 ± 1.01

2/5

MTEC
National Metal and Materials Technology Center

รูป ง.3 แสดงวิธีการ และรายงานผลการวิเคราะห์ ขนาดอนุภาคของยิปซัมสังเคราะห์ (ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2545)

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
73/1 ถนนพระรามที่ 6 แขวงทุ่งพญาไท ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ (662) 644-8150-94 โทรสาร (662) 644-8077
http://www.mtec.or.th

MTEC
National Metal and Materials Technology Center

National Metal and Materials Technology Center
National Science and Technology Development Agency.
73/1 Rama VI Road, Tung Phayathai, Rajdhevee, Bangkok 10400 Thailand.
TEL. (662) 644-8150-94 FAX : (662) 6448077
http://www.mtec.or.th

ตารางแนบที่ 1

Result: Analysis Report

Sample Details

Sample ID: Gypsum1_1
Sample File: TS428_45
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\TECH_45\
Sample Notes: dispersing medium : distilled water
treatment : stir

Run Number: 1
Record Number: 28

Measured: 11 Mar 2002 15:14PM
Analysed: 11 Mar 2002 15:14PM
Result Source: Analysed

System Details

Range Lens: 300RF mm
Presentation: 3OAD
Analysis Model: Polydisperse
Modifications: None

Beam Length: 2.40 mm
[Particle R.I. = (1.5295, 0.0000); Dispersant R.I. = 1.3300]

Sampler: MS1

Obscuration: 13.4 %
Residual: 0.865 %

Result Statistics

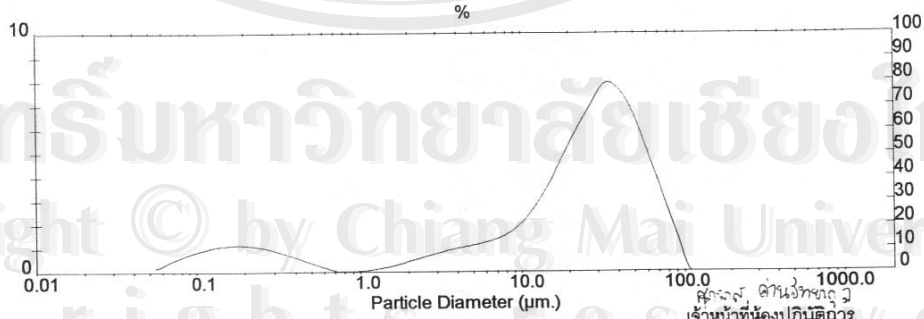
Distribution Type: Volume
Mean Diameters:
D [4, 3] = 27.96 um

Concentration = 0.0234 %Vol
D (v, 0.1) = 0.30 um
D [3, 2] = 1.12 um

Density = 1.000 g / cub. cm
D (v, 0.5) = 25.00 um
Span = 2.348E+00

Specific S.A. = 5.3529 sq. m / g
D (v, 0.9) = 58.99 um
Uniformity = 7.107E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.19	0.06	0.19	6.63	1.42	7.72	22.34
0.06	0.38	0.07	0.58	7.72	1.65	9.00	23.99
0.07	0.56	0.08	1.14	9.00	1.99	10.48	25.98
0.08	0.73	0.09	1.86	10.48	2.46	12.21	28.44
0.09	0.87	0.11	2.73	12.21	3.09	14.22	31.53
0.11	0.99	0.13	3.72	14.22	3.85	16.57	35.38
0.13	1.08	0.15	4.80	16.57	4.70	19.31	40.07
0.15	1.13	0.17	5.93	19.31	5.58	22.49	45.65
0.17	1.15	0.20	7.08	22.49	6.41	26.20	52.06
0.20	1.12	0.23	8.20	26.20	7.17	30.53	59.23
0.23	1.05	0.27	9.25	30.53	7.87	35.56	67.09
0.27	0.94	0.31	10.19	35.56	7.80	41.43	74.89
0.31	0.80	0.36	10.99	41.43	7.22	48.27	82.12
0.36	0.65	0.42	11.63	48.27	6.20	56.23	88.32
0.42	0.48	0.49	12.12	56.23	4.89	65.51	93.21
0.49	0.32	0.58	12.44	65.51	3.58	76.32	96.79
0.58	0.17	0.67	12.61	76.32	2.26	88.91	99.05
0.67	0.06	0.78	12.67	88.91	0.95	103.58	100.00
0.78	0.05	0.91	12.72	103.58	0.00	120.67	100.00
0.91	0.06	1.06	12.77	120.67	0.00	140.58	100.00
1.06	0.10	1.24	12.87	140.58	0.00	163.77	100.00
1.24	0.17	1.44	13.04	163.77	0.00	190.80	100.00
1.44	0.26	1.68	13.30	190.80	0.00	222.28	100.00
1.68	0.38	1.95	13.68	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	0.50	2.28	14.18	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	0.63	2.65	14.81	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	0.75	3.09	15.57	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.88	3.60	16.44	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.99	4.19	17.43	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	1.07	4.88	18.50	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	1.16	5.69	19.65	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	1.27	6.63	20.92	754.23	0.00	878.67	100.00



สุกรณ์ ศ่านจิทยกุล
เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ

Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel:=+[44] (0)1684-892456 Fax:+[44] (0)1684-892789

Mastersizer S Ver. 2.19
Serial Number: 32734-89

p. 1
17 May 02 10:5

MTEC
National Metal and Materials Technology Center

รูป ง.4 แสดงผลการวิเคราะห์ ขนาดอนุภาคของยิปซัมสังเคราะห์ จากห้องปฏิบัติการทดลอง (ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2545)

3. ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด น้ำยิปซัมที่สุ่มตัวอย่าง ก่อนและหลังการทดลอง

MTEC
National Metal and Materials Technology Center

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน
ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120
โทรศัพท์ : (662)564-6500 โทรสาร : (662)564-6501-5
www.mtec.or.th

National Metal and Materials Technology Center
National Science and Technology Development Agency
114 Thailand Science Park Paholyothin Rd., Klong 1,
Klong Luang, Pathumthani 12120 Thailand
Tel : (662)564-6500 Fax : (662)564-6501-5
www.mtec.or.th

MTEC No. 1344/47

11 มิถุนายน 2547

รายงานผลการวิเคราะห์

ตัวอย่างจาก : คุณเฉลิมเกียรติ สวรรค์วงศ์
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย - โรงไฟฟ้าแม่เมาะ
155/5 ถ.พระบาท ต.พระบาท อ.เมือง จ.ลำปาง 52000
โทรศัพท์ : 0 5425 3182, 0 9954 5102 โทรสาร : 0 5425 3188

ทดสอบโดย : ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะของผง
งานห้องปฏิบัติการเครื่องมือทดสอบทั่วไป ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

วันที่รับตัวอย่าง : 3 มิถุนายน 2547

วันที่วิเคราะห์ : 7 มิถุนายน 2547

ตัวอย่างที่วิเคราะห์: : น้ำยิปซัมสังเคราะห์ จำนวน 2 ตัวอย่าง

เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ : Viscometer DV II+ (Brookfield)

สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ : Spindle : RV spindle No.1
Temperature : 60 °C, Speed : 120 rpm
จำนวนครั้งในการทดลอง : 3 ครั้ง

หลักการของเครื่อง

เครื่อง Viscometer DV II+ เป็นเครื่องวัดความหนืดที่ใช้หลักการในการให้แรงหมุน (torque) กับ Spindle (ที่ผ่านการ calibrated แล้ว) โดยที่ Spindle จุ่มอยู่ในสารตัวอย่างที่เป็นของเหลว ของเหลวจะออกแรงต้าน ซึ่งแรงต้านนั้นจะบอกออกมาเป็นค่าความหนืด

ผลการวิเคราะห์ :

ตารางที่ 1 : ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของสารตัวอย่าง

สารตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบของ Spindle (rpm)	ค่าความหนืด (cP)			ค่าเฉลี่ย (cP)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
A	60	120	75.1	75.9	76.6	75.9±0.75
B	60	120	76.2	76.5	74.7	75.8±0.96

หมายเหตุ : เนื่องจากตัวอย่างทั้งสอง มีความเสถียรในการกระจายตัวต่ำ จึงเกิดการแยกชั้นระหว่างของแข็งและของเหลวอย่างรวดเร็ว ทำให้การวัดค่าความหนืดมีค่าที่แตกต่างกันไปบ้างในการทดลอง 3 ครั้ง

รูป ง.5 แสดงรายงานผลการวิเคราะห์ ค่าความหนืด น้ำยิปซัมของน้ำยิปซัมสังเคราะห์ (ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2547)

ภาคผนวก จ

คุณลักษณะทางเทคนิคของ เครื่องมือวัดค่าความดันแตกต่าง พร้อมชุดหน้าแปน

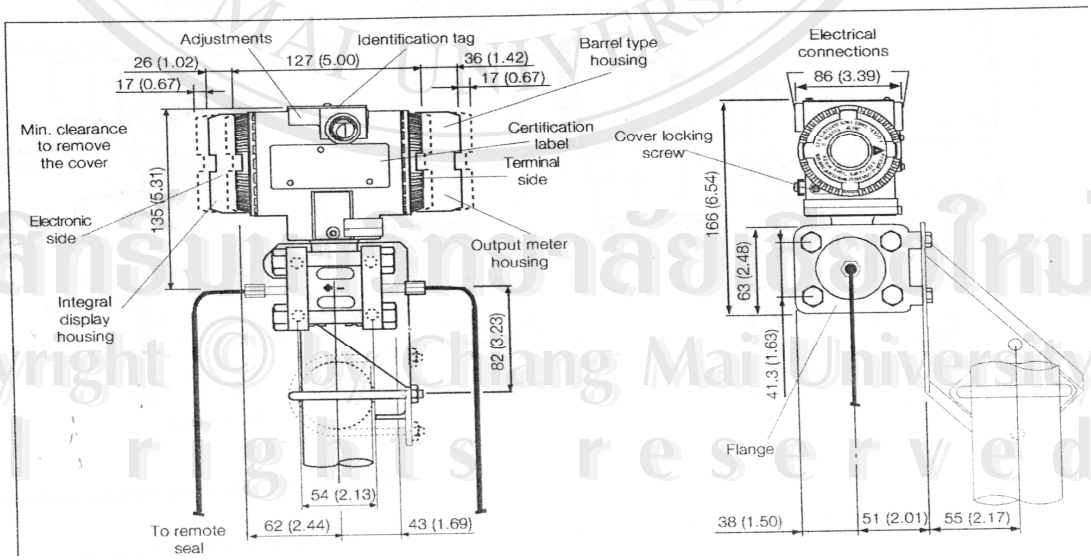
Technical specification of Differential Pressure Transmitter with Remote Seal "ABB" model "264DR" and "S264F"

1. คุณลักษณะของเครื่องวัดค่าความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitter)

1.1 Sensor range and span limits	
Range limits	- 400 mbar (LRL) and 400 mbar (URL)
Span	6.7 mbar and URL can be adjusted to ± URL (Turndown = 0.5)
1.2 Operating temp. limits	- 40 °C and + 85 °C at ambient temp. – 20 °C and + 70 °C
1.3 Pressure limits	
Over pressure	160 bars (without damage transmitter)
Static pressure	13 mbar abs. and 160 bars
1.4 Humidity	
Relative humidity	up to 100 % annual average
Condensing	Admissible
1.5 Insulation resistance	more than 100 MΩ at 1,000 V D.C.
1.6 Vibration resistance	Acceleration up to 2G at freq. up to 1,000 Hz
1.7 Damping (selectable time constant)	0, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8 or 16 sec.
1.8 Output	
Signal	4 – 20 mA with HART communication
Indicator	Programmable signal meter and HART configuration
Current limits	3.8 mA (Lower limit) and 20.5 mA (Upper limit)

Update time	25 mS
1.9 Power supply	10.5 to 42 V D.C.
1.10 Electrical connection	two ½ inch NPT threaded conduit entries
1.11 Terminal block	three terminal for signal / external meter wiring up to 2.5 mm^2 (14 AWG) and three connection points for test and communication
1.12 Mounting Position	mounted in any position
1.13 Material	
Sensor housing	Aluminum alloy
Process flange	Carbon Steel
Seal side process diaphragm	AISI 316L ss.
Seal side fill fluid	Silicone oil – DC 200™
Local zero and span adjustments	Glass filled polycarbonate plastic (removable)
Process connections	¼ inch NPT on conventional flange
1.14 Overall dimension	189 (W) x 166 (H) x 51 (D) mm.
1.15 Weight	Approx. 3 kg (without seals)

MOUNTING DIMENSIONS (not for construction unless certified) - dimensions in mm (in)
264DR/PR/VR transmitter on bracket for vertical or horizontal 60mm (2in) pipe mounting (barrel housing)



รูป จ.1 แสดงขนาด สำหรับการติดตั้งเครื่องมือวัดค่าความดันแตกต่าง (ที่มา: ABB Operating instruction 2600T Series Data Sheet No. SS/ 264XR_1)

2. ประสิทธิภาพของเครื่องมือวัด และองค์ประกอบที่มีผลกระทบ

2.1 Base accuracy	± 0.075 %
2.2 Reference condition	
Ambient temp.	20 °C
Relative humidity	65 %
Atmospheric pressure	1,013 mbar
Mounting Position	Vertical
HART digital trim value	4 – 20 mA and zero based range
2.3 Operating influences	
Temperature effect	± (0.04 % URL + 0.065 % span) for ambient temp. change per 20 K within limits – 20 and + 65 °C
CoMeter ambient temp.	reading error ± 0.15 % of max. span (16 mbar) change per 20 K within limits – 20 and + 70 °C
Static pressure	zero error ± 0.25 % URL and span error ± 0.25 % of reading per 20 bar
Supply voltage	less than 0.005 % URL per volt
Radio frequency	less than 0.10 % of span from 20 to 1,000 MHz
Vibration effect	± 0.10 % of URL

3. การตั้งค่าใช้งาน HART configuration

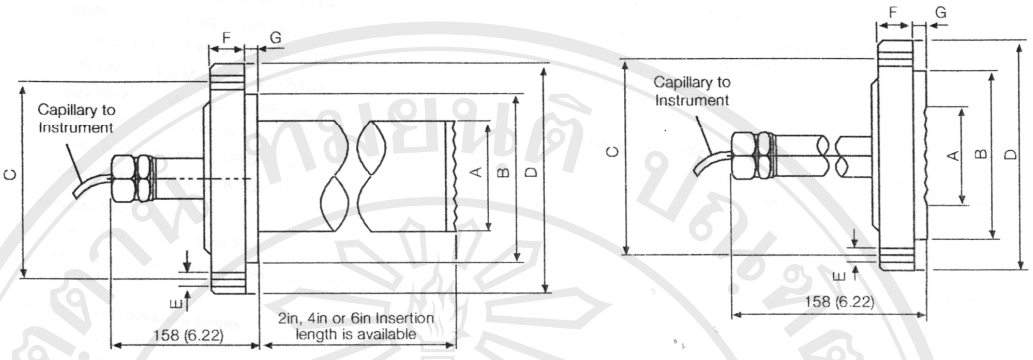
Measure profile	Differential pressure
Engineering unit	mbar
Output scale 0% (4 mA)	Zero
Output scale 100% (20 mA)	Upper range limit (400 mbar)
Output	Linear
Limits hysteresis	0.5 % of output scale
DampingSetting	1 sec.

4. คุณลักษณะของหน้าแปนรับสัญญาณความดัน (Remote Seals)

4.1 Seal type	Flanged flush with serrated finish
4.2 Seal size	2 inches / DN 50 – DIN 2526 PN 16
4.3 Capillary length	2 meters
4.4 Process filled fluid	
Fluid type	Silicone oil – DC 200™
Fluid specific gravity	0.93
Kinematics Viscosity	10 cSt. at 25 °C
Thermal expansion	1.08×10^{-3} per °C
4.5 Operating conditions	
Maximum temp.	200 °C at Pressure abs. more than 35 mbar
Minimum temp.	- 40 °C
Minimum pressure abs.	0.7 mbar
4.6 Maximum working pressure	16 bar at temp. 20 – 120 °C
4.7 Material	
Flange and seat	Carbon Steel
Diaphragm	AISI 316L ss.
Capillary protection	AISI 316 ss. armour
4.8 Error	
Seal error	0.07 mbar
Capillary error	0.17 mbar per meter
System (sensor) error	0.5 mbar

S264F Model Flanged Extended and Flush Diaphragm Remote Seal

The extended and flush diaphragm remote seal is designed to connect to ANSI or DIN flanged pipe fitting. For liquid level measurement installations the seal connects to an ANSI or DIN flanged tank nozzle (Schedule 40).



Flanged Extended Diaphragm Seal

Flanged Flush Diaphragm Seal

Size/Rating	Dimensions mm (in)								N° of holes
	A (dia) flush	A (dia) extended	B (dia)	C (dia)	D (dia)	E (dia)	F	G	
2in ANSI CL 150	60 (2.36)	48 (1.9)	92.1 (3.62)	120.5 (4.74)	152.5 (6)	20 (0.79)	19.5 (0.77)	9.5 (0.37)	4
2in ANSI CL 300	60 (2.36)	48 (1.9)	92.1 (3.62)	127 (5)	165 (6.5)	20 (0.79)	22.5 (0.88)	9.5 (0.37)	8
2in ANSI CL 600	60 (2.36)	NA	92.1 (3.62)	127 (5)	165 (6.5)	20 (0.79)	25.5 (1)	9.5 (0.37)	8
2in ANSI CL 900	60 (2.36)	NA	92.1 (3.62)	165 (6.5)	216 (8.5)	26 (1.02)	38.5 (1.51)	9.5 (0.37)	8
3in ANSI CL 150	89 (3.5)	72 (2.83)	127 (5)	152.5 (6)	190.5 (7.5)	20 (0.79)	24 (0.94)	9.5 (0.37)	4
3in ANSI CL 300	89 (3.5)	72 (2.83)	127 (5)	168.5 (6.63)	210 (8.26)	22 (0.86)	28.5 (1.12)	9.5 (0.37)	8
3in ANSI CL 600	89 (3.5)	NA	127 (5)	168.5 (6.63)	210 (8.26)	22 (0.86)	32 (1.26)	9.5 (0.37)	8
3in ANSI CL 900	89 (3.5)	NA	127 (5)	190.5 (7.5)	241 (9.48)	26 (1.02)	38.5 (1.51)	9.5 (0.37)	8
4in ANSI CL 150	89 (3.5)	94 (3.7)	157.2 (6.2)	190.5 (7.5)	228.6 (9)	20 (0.79)	24 (0.94)	9.5 (0.37)	8
4in ANSI CL 300	89 (3.5)	94 (3.7)	157.2 (6.2)	200.2 (7.88)	254 (10)	22 (0.86)	32 (1.26)	9.5 (0.37)	8
DN50 DIN PN16	60 (2.36)	48 (1.9)	102 (4.02)	125 (4.92)	165 (6.5)	18 (0.71)	20 (0.79)	9.5 (0.37)	4
DN50 DIN PN40	60 (2.36)	48 (1.9)	102 (4.02)	125 (4.92)	165 (6.5)	18 (0.71)	20 (0.79)	9.5 (0.37)	4
DN50 DIN PN64	60 (2.36)	NA	102 (4.02)	135 (5.31)	180 (7.08)	22 (0.86)	26 (1.02)	9.5 (0.37)	4
DN50 DIN PN100	60 (2.36)	NA	102 (4.02)	145 (5.71)	195 (7.67)	26 (1.02)	28 (1.1)	9.5 (0.37)	4
DN50 DIN PN160	60 (2.36)	NA	102 (4.02)	145 (5.71)	195 (7.67)	26 (1.02)	30 (1.18)	9.5 (0.37)	4
DN80 DIN PN16	89 (3.5)	72 (2.83)	138 (5.43)	160 (6.3)	200 (7.87)	18 (0.71)	20 (0.79)	9.5 (0.37)	8
DN80 DIN PN40	89 (3.5)	72 (2.83)	138 (5.43)	160 (6.3)	200 (7.87)	18 (0.71)	24 (0.94)	9.5 (0.37)	8
DN80 DIN PN64	89 (3.5)	NA	138 (5.43)	170 (6.7)	215 (8.46)	22 (0.86)	28 (1.1)	9.5 (0.37)	8
DN80 DIN PN100	89 (3.5)	NA	138 (5.43)	180 (7.08)	230 (9.05)	26 (1.02)	32 (1.26)	9.5 (0.37)	8
DN80 DIN PN160	89 (3.5)	NA	138 (5.43)	180 (7.08)	230 (9.05)	26 (1.02)	36 (1.42)	9.5 (0.37)	8
DN100 DIN PN16	89 (3.5)	94 (3.7)	158 (6.22)	180 (7.08)	220 (8.66)	18 (0.71)	20 (0.79)	9.5 (0.37)	8
DN100 DIN PN40	89 (3.5)	94 (3.7)	162 (6.38)	190 (7.48)	235 (9.25)	22 (0.86)	24 (0.94)	9.5 (0.37)	8

รูป จ.2 แสดงขนาด และรูปร่างของหน้าแปนรับสัญญาณความดัน (ที่มา: ABB Operating instruction 2600T Series Data Sheet No. SS/ S264_1)

ภาคผนวก ฉ

คุณลักษณะทางเทคนิคของ เครื่องบันทึกข้อมูลแบบไม่ใช้กระดาษ

Technical specification of Paperless chart recorder "Penny + Giles" model "Minitrend™"

4. คุณลักษณะทั่วไป (General Specification)

1.1 Display	5 ½ inch colour TFT liquid crystal display (Quarter VGA)
1.2 Data storage medium	1.44 Mbytes data storage on 3 ½ inch disk
1.3 No. of input channels	4
1.4 Input signals	4 – 20 mA or 0 – 5 V
1.5 Scales and titles	Menu selectable or PC configurable
1.6 Power supply	90 – 250 V A.C., 50 / 60 Hz
1.7 Power consumption	Less than 30 VA
1.8 Battery Life	1 year unpowered and 10 years powered
1.9 Operate Temp.	0 - +50 °C (-10 - +60 °C in Storage)
1.10 Relative humidity	10 – 90 % non condensing
1.11 Overall dimension	144 (W) x 144 (H) x 337 (D) mm.
1.12 Weight	Approx. 3 kg

5. คุณลักษณะเฉพาะของรุ่น Minitrend™

2.1 Display update time	Bar graph and digital display updated twice per second
2.2 Chart speeds	5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 90 Second per division
2.3 Data logging rate	20 samples per division

2.4 Sampling time 125 mS for all channels, 16 mS per channel

2.5 Standard analogue input card

Voltage	D.C.	Input resistance > 1 MΩ	
	Range	0 – 5 V	
	Resolution	0.1 %	
	Accuracy	0.5 %	
	Ambient temp. effect		0.02 % per °C
Current	D.C.	Input resistance 10 Ω	
	Range	0 – 20 mA, 4 – 20 mA	
	Resolution	0.1 %	
	Accuracy	0.5 %	
	Ambient temp. effect		0.05 % per °C

2.6 Universal input analogue card

Resolution of analogues		16 bit 0.0015 %
Accuracy of analogues	Voltage	± 100 mV ± 0.02 %
		± 200 mV ± 0.02 %
	Current	± 10 mA ± 0.04 %
		± 20 mA ± 0.04 %
Ambient temp. effect		Reference accuracy ± 1 °C
Source resistance	T /CmV	0.5 °C per 100 Ω
	RTD	0.1 °C per Ω
Temp. effect	V, mV	0.005 % per °C
	mA	0.02 % per °C
	T /C	0.01 % per °C
	RTD	0.035 % per °C
Long term stability		0.1 % per year

2.7 Reference conditions Temperature 20 °C

Humidity 65 % RH ± 15 %

ภาคผนวก ช

ผลการสอบเทียบ เครื่องมือวัดค่าความดันแตกต่าง พร้อมชุดหน้าแปน

Technical specification of Differential Pressure Transmitter with Remote Seal "ABB" model "264DR" and "S264F"

1. การสอบเทียบ จากตัวแทนจำหน่ายของ ABB (ประเทศไทย) เมื่อวันที่ 03 / 02 / 2004

เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบ		Stazione Automatica No.1 and Fluke 45
ช่วงที่สอบเทียบ	Pressure	0 – 160 mm. H_2O Analogue signal 4 – 20 mA
ผลการสอบเทียบ	Error	-0.038 ถึง +0.05 %

ตามเอกสารในรูปที่ ช.1

2. การสอบเทียบ โดยหน่วยงานสอบเทียบอุปกรณ์วัดคุมของ หบอม2 – ผฟ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

CALIBRATION DATA FOR CONTROL & MEASUREMENT

ชื่ออุปกรณ์	Differential Pressure Transmitter with Remote Seal
แบบ / รุ่น	ABB model 264DRFSRRRA1 D7B1N4
หมายเลขเครื่อง	6404000450
เกณฑ์การยอมรับ	± 0.1 %
เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบ	Automatic Pressure Calibrator
แบบ / รุ่น	TRANSMATION model 190 P
หมายเลขเครื่อง	70782801
รหัสครุภัณฑ์	1925-20-6662-E0007 001
วันครบกำหนด	02 / 03 / 2551
ช่วงที่สอบเทียบ	Pressure 0 – 4,080 mm. H_2O (0 – 400 mBar)
	Analogue signal 4 – 20 mA

2.1 ผลการสอบเทียบ ครั้งที่ 1 วันที่ 16-05-47 แสดงดังตาราง ช.1

เอกสารอ้างอิง MI-00-MMC5-01

สภาวะแวดล้อม ที่อุณหภูมิ 25 °C ที่ความชื้น 65 %

ตาราง ช.1 แสดงผลการสอบ / ปรับเทียบอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง ครั้งที่ 1

MM.WG	SHULD BE (MA)	AS FOUND	AS LEFT
0	4	4.00	4.00
1020	8	8.01	8.00
2040	12	12.01	12.00
3060	16	16.01	16.00
4080	20	20.01	20.00

ความไม่แน่นอนของการวัด +/- 0.0003 MA ที่ความเชื่อมั่น 95 %

ผลการดำเนินการ ผ่าน ตามเกณฑ์การยอมรับ ตามเอกสารในรูปที่ ช.2

2.2 ผลการสอบเทียบ ครั้งที่ 2 วันที่ 10-08-47 แสดงดังตาราง ช.2

เอกสารอ้างอิง MI-00-MMC5-02

สภาวะแวดล้อม ที่อุณหภูมิ 24 °C ที่ความชื้น 62 %

ตาราง ช.2 แสดงผลการสอบ / ปรับเทียบอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง ครั้งที่ 2

MM.WG	SHULD BE (MA)	AS FOUND	AS LEFT
0	4	4.01	4.00
1020	8	8.02	8.00
2040	12	12.02	12.00
3060	16	16.02	16.00
4080	20	20.02	20.00

ความไม่แน่นอนของการวัด +/- 0.0003 MA ที่ความเชื่อมั่น 95 %

ผลการดำเนินการ ผ่าน ตามเกณฑ์การยอมรับ ตามเอกสารในรูปที่ ช.3

2.3 ผลการสอบเทียบ ครั้งที่ 3 วันที่ 21-12-47 แสดงดังตาราง ช.3

เอกสารอ้างอิง MI-00-MMC5-04

สภาวะแวดล้อม ที่อุณหภูมิ 25 °C ที่ความชื้น 61 %

ตาราง ช.3 แสดงผลการสอบ / ปรับเทียบอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง ครั้งที่ 3

MM.WG	SHULD BE (MA)	AS FOUND	AS LEFT
0	4	3.98	4.00
1020	8	7.97	7.99
2040	12	11.97	11.99
3060	16	15.97	15.99
4080	20	19.97	20.00

ความไม่แน่นอนของการวัด +/- 0.0016 MA ที่ความเชื่อมั่น 95 %

ผลการดำเนินการ ผ่าน ตามเกณฑ์การยอมรับ ตามเอกสารในรูปที่ ช.4

ABB SACE Spa
Via Statale, 113 - 22016 Lenno (CO) Italy
Tel. +39 (0)34458111 - Fax. +39 (0)34456278

CERTIFICATO DI TARATURA
CALIBRATION CERTIFICATE
CERTIFICAT DE ETALONNAGE
KALIBRIERUNG - PROTOKOLL

Vs. Ordine - Your Order - V/Commande - Ihr Aufrag
4500096830
Pos Vs.Ordine e Rif. - Yr Item - Pos.Or. - Best Pos.
YR REF: REVISION 1 DT 18/11/03
Ns Conferma - Our Job N. - n/accusé de réception N. - Unser Auftrag
1803030174
Item Cliente - Customer Item

Spett. - Messrs. - Messieures - Kunde
THABB02
ABB LIMITED /THABB
161/1 SG TOWER 1,
10330
LUMPINI, PRATUMWAN-BANGKOK

Pos - Item	S/Pos	U.M.	Quantità - Q.ty - Quant - Menge	Uscita - OutPut / Sortie - Ausfang
001000	000001	ST	1	HART(4-20mA)

Dati Strumento - Instrument data Codice - Product code	264DRFSRRRA1 D7B1N4 S264FHRMGFSACS1 S264FLRMGFSACS1
Numero di serie - Serial number No. de série - Fabr. -Nr.	6404000450
Data - Date Kalibrier Datum	03 / 02 / 2004
Massimo Errore - Max. deviation Max. Kennlinienabweichung - Déviation max.	0.1
Campo di misura - Calibration Range Eingest. auf. - Ajustée à	0 / 160 inH2O 20C

Tag - Name	Descriptor	Message

TEST > PASS

% Range	Pres. applicata Input press.	Pres. rilevata Output press.	Unita' Unit	Uscita mA Output mA	Errore % Deviation %	Limite di errore Dev. Limit	Esito Test Test Result
0%	0	-0.01	inH2O 20C	3.9988	-0.007	0.1	PASS
50%	80	80.06	inH2O 20C	12.006	0.037	0.1	PASS
100%	160	159.94	inH2O 20C	19.994	-0.038	0.1	PASS
50%	80	80.09	inH2O 20C	12.008	0.05	0.1	PASS
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-

Si attesta che lo strumento e' stato collaudato secondo gli standard ABB , e' costruttivamente rispondente alle caratteristiche succitate e in conformita' al vostro ordine.
We certify that instrument has been tested according to the ABB standard , it is manufactured in compliance with the above mentioned characteristics and is with the order.
Nous certifions que l'instrument a été contrôlé et répond aux normes ABB , qu'il posséde toutes les caractéristiques ci-dessus citées et conformite' a la commande.
Wir bestätigen dass die Geräte nach dem ABB standart getested wurden und der oben augeführten Charakteristik entsprechen und esentspricht beider bestellung.

Prova di tensione - Test Voltage - Essai de tension - Spannungsprüfung [kV =]
1

Prova Sovrapressione - Over Range pressure test - Essai de surpression - Max Uberdruck
PASS (MWP = 580 Psi)

Nota - Note :
Le misurazioni sopra registrate sono state ottenute in condizioni di test standard di produzione e hanno riferimento negli standard nazionali attraverso i laboratori del S.I.T. (Servizio Italiano Taratura)
The measurement recorded above were obtained under standard productions test conditions and are traceable to national standards trough the laboratories of S.I.T.(Servizio Italiano Taratura)

Dati trasduttore - Transducer data :
Numero di serie - Serial Number **2603112783**
Limiti di pres. -Pressure Limits **-40 / 40 kPa**

Dati Elettronica secondaria - Secondary Electronic Data :
Numero di serie - Serial number **2003968**
Software Rev. **1**
Hardware Rev. **8**
Codice Costruttore - Manuf. Number **1M10000**
Anno Costruttore - Manuf. Year **3**
Settimana Costruttore - Manuf. Week **2**

Apparecchio di test - Equipment : Fin_60CT_Auto_1
Doc n° **19600** Test Timer (MM:SS) **11: 25**
Tipo - Type **Stazione Automatica N° 1**
Attrezzo n° - Tool n° **5**
Modo operativo - Operative Mode **Automatic Configuration**
Multimeter type **FLUKE 45 N. Ser. 6000108 (1.7 D1.0)**
Pressure Control (1) **MENSOR PCS400 gauge 0 / 40 kPa G. N.Ser. 180753**
Pressure Control (2) **MENSOR PCS400 gauge 0 / 800 kPa G. N.Ser. 180755**
Pressure Control (3) **RUSKA 7215 0 / 8000 kPa G. N.Ser. 52451**

Rif. Manuale Operativo - Rif. Operating Instructions :
Vedi foglio manuali

Controllo visivo e dimensionale
Visual and dimensional Chek **PASS**

Lenno
03-02-2004

ABB
QUALITY TEST CHECK
A. MORONI

Cliente - Customer - Client - Kunde

รูป ช.1 แสดงใบรับรองผลการสอบเทียบ เครื่องมือวัดก่อนนำมาใช้งาน (ที่มา : ตัวแทนจำหน่ายของ ABB ประเทศไทย, ก.พ. 2547)

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

CALIBRATION DATA SHEET

ชื่อเครื่องมือ	DIFF. P. TRANSMITTER & REMOTE SEAL	เอกสารอ้างอิง	MI-00-MMC5-01
แบบ / รุ่น	ABB / 264DRFSRRRA1 D7B1N4	หมายเลขเครื่อง	6404000450
สภาวะแวดล้อมอุณหภูมิ	25 องศา CELCIUS	ความชื้น	65 %
หน่วยงาน	หบอม2 – ผฟ	เกณฑ์การยอมรับ	+/- 0.1 %
ช่วงเวลาการสอบเทียบ/ปรับเทียบ		AKS. NO.	-
วันที่สอบเทียบ	16-05-47	วันครบกำหนด	-

เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้

ลำดับ	ชื่อ	แบบ/รุ่น	หมายเลขเครื่อง	วันครบกำหนด	หมายเหตุ
1	TRANSMATION	TM 190 P	70782801	2/03/2551	

ผลการ ☑ สอบเทียบ ☑ ปรับเทียบ

MM.WG	SHULD BE (MA)	AS FOUND	AS LEFT
0	4	4.00	4.00
1020	8	8.01	8.00
2040	12	12.01	12.00
3060	16	16.01	16.00
4080	20	20.01	20.00

SETTING SW 1 SW.2

	AS FOUND		AS LEFT	
	INC.	DEC.	INC.	DEC.
SW.1				
SW.2				

หมายเหตุ 1. เคลื่อนย้ายอุปกรณ์ควรใช้ความระมัดระวัง

ความไม่แน่นอนของการวัด = +/- 0.0003 MA ที่ความเชื่อมั่น 95 %

ผลการดำเนินการ ☑ ผ่าน ☐ ไม่ผ่าน

ผู้ดำเนินการ บุญส่ง เทพแปง ผู้ตรวจสอบ

(นายบุญส่ง เทพแปง) (นายชุมพล แสงสุกดี)

MF-00-MMC5-01 / REV.-00

รูป ช.2 แสดงใบรับรองผลการสอบ / ปรับเทียบอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง ครั้งที่ 1 (ที่มา : หน่วยงานสอบเทียบอุปกรณ์วัดคุมของ หบอม2 – ผฟ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ, พ.ค. 2547)

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

CALIBRATION DATA SHEET

ชื่อเครื่องมือ	DIFF. P. TRANSMITTER & REMOTE SEAL	เอกสารอ้างอิง	MI-00-MMC5-02
แบบ / รุ่น	ABB / 264DRFSRRRA1 D7B1N4	หมายเลขเครื่อง	6404000450
สภาวะแวดล้อมอุณหภูมิ	24 องศา CELCIUS	ความชื้น	62 %
หน่วยงาน	หบอม2 – ผฟ	เกณฑ์การยอมรับ	+/- 0.1 %
ช่วงเวลาการสอบเทียบ/ปรับเทียบ		AKS. NO.	-
วันที่สอบเทียบ	10-08-47	วันครบกำหนด	-

เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้

ลำดับ	ชื่อ	แบบ/รุ่น	หมายเลขเครื่อง	วันครบกำหนด	หมายเหตุ
1	TRANSMATION	TM 190 P	70782801	2/03/2551	

ผลการ ☑ สอบเทียบ ☑ ปรับเทียบ

MM.WG	SHULD BE (MA)	AS FOUND	AS LEFT
0	4	4.01	4.00
1020	8	8.02	8.00
2040	12	12.02	12.00
3060	16	16.02	16.00
4080	20	20.02	20.00

SETTING SW 1 SW.2

	AS FOUND		AS LEFT	
	INC.	DEC.	INC.	DEC.
SW.1				
SW.2				

หมายเหตุ 1. เคลื่อนย้ายอุปกรณ์ควรใช้ความระมัดระวัง

ความไม่แน่นอนของการวัด = +/- 0.0003 MA ที่ความเชื่อมั่น 95 %

ผลการดำเนินการ ☑ ผ่าน ☐ ไม่ผ่าน

ผู้ดำเนินการ บุญส่ง เทพแปง (นายบุญส่ง เทพแปง) ผู้ตรวจสอบ (นายชุมพล แสงสุกดี)

MF-00-MMC5-01 / REV.-00

รูป ช.3 แสดงใบรับรองผลการสอบ / ปรับเทียบอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง ครั้งที่ 2 (ที่มา : หน่วยงานสอบเทียบอุปกรณ์วัดคุมของ หบอม2 – ผฟ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ, ส.ค. 2547)

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

CALIBRATION DATA SHEET

ชื่อเครื่องมือ	DIFF. P. TRANSMITTER & REMOTE SEAL	เอกสารอ้างอิง	MI-00-MMC5-04
แบบ / รุ่น	ABB / 264DRFSRRRA1 D7B1N4	หมายเลขเครื่อง	6404000450
สภาวะแวดล้อมอุณหภูมิ	25 องศา CELCIUS	ความชื้น	61 %
หน่วยงาน	หบอม2 – ผฟ	เกณฑ์การยอมรับ	+/- 0.1 %
ช่วงเวลาการสอบเทียบ/ปรับเทียบ		AKS. NO.	-
วันที่สอบเทียบ	21-12-47	วันครบกำหนด	-

เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้

ลำดับ	ชื่อ	แบบ/รุ่น	หมายเลขเครื่อง	วันครบกำหนด	หมายเหตุ
1	TRANSMATION	TM 190 P	70782801	2/03/2551	

ผลการ ☑ สอบเทียบ ☑ ปรับเทียบ

MM.WG	SHULD BE (MA)	AS FOUND	AS LEFT
0	4	3.98	4.00
1020	8	7.97	7.99
2040	12	11.97	11.99
3060	16	15.97	15.99
4080	20	19.97	20.00

SETTING SW 1 SW.2

	AS FOUND		AS LEFT	
	INC.	DEC.	INC.	DEC.
SW.1				
SW.2				

หมายเหตุ 1. เคลื่อนย้ายอุปกรณ์ควรใช้ความระมัดระวัง

ความไม่แน่นอนของการวัด = +/- 0.0016 MA ที่ความเชื่อมั่น 95 %

ผลการดำเนินการ ☑ ผ่าน ☐ ไม่ผ่าน

ผู้ดำเนินการ บุญส่ง เทพแปง ผู้ตรวจสอบ

(นายบุญส่ง เทพแปง) (นายชุมพล แสงสุกดี)

MF-00-MMC5-01 / REV.-00

รูป ช.4 แสดงใบรับรองผลการสอบ / ปรับเทียบอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง ครั้งที่ 3 (ที่มา : หน่วยงานสอบเทียบอุปกรณ์วัดคุมของ หบอม2 – ผฟ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ, ธ.ค. 2547)

ภาคผนวก ซ

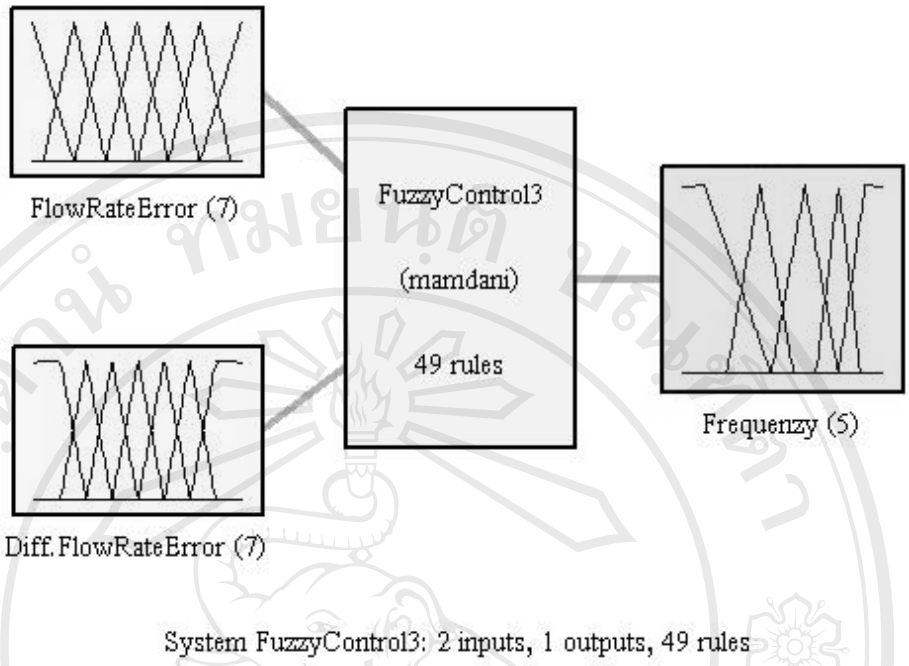
ขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณควบคุม ด้วยซอฟแวร์ MATLAB

การใช้งาน ซอฟแวร์สำเร็จรูป MATLAB เพื่อแสดงสัญญาณควบคุม ที่ได้จากการออกแบบ สำหรับระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก ที่จะใช้ควบคุมระดับความเร็วรอบเครื่องสูบน้ำยิปซัมโดยใช้การประมวลผลด้วย Fuzzy Logic Tool Box ในซอฟแวร์ดังกล่าว มีขั้นตอนดังนี้

1. การกำหนดรูปแบบการประมวลผล ได้แก่ กำหนดให้ระบบ Fuzzy Logic ประกอบด้วย ตัวแปรอินพุท 2 ตัว และเอาท์พุท 1 ตัว ใช้วิธีการของ Mamdani เป็นหน่วยวินิจฉัย และใช้วิธี CENTER-OF-AREAS ในการแปลงผลลัพธ์ให้อยู่ในรูปของสัญญาณควบคุม โดยมีโครงสร้างของคำสั่ง และรูปแบบในซอฟแวร์ ดังนี้

```
Name='FuzzyControl3'
Type='mamdani'
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=49
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'
```

และมีหน้าต่างบนซอฟแวร์แสดง ดังรูปที่ ซ.1



รูป ซ.1 แสดงหน้าต่างการกำหนดรูปแบบประมวลผล ด้วยวิธีการ Mamdani ในซอฟแวร์ Fuzzy Logic Tool Box

2. การกำหนดรูปแบบค่าความเป็นสมาชิก ของตัวแปรอินพุท "อัตราการไหลคลาดเคลื่อน"

[Input1]

Name='FlowRateError'

Range=[-2.5 2.5]

NumMFs=7

MF1='NB':'trimf',[-4.5 -2.5 -1.5]

MF2='NM':'trimf',[-2.25 -1.5 -0.75]

MF3='PM':'trimf',[0.75 1.5 2.25]

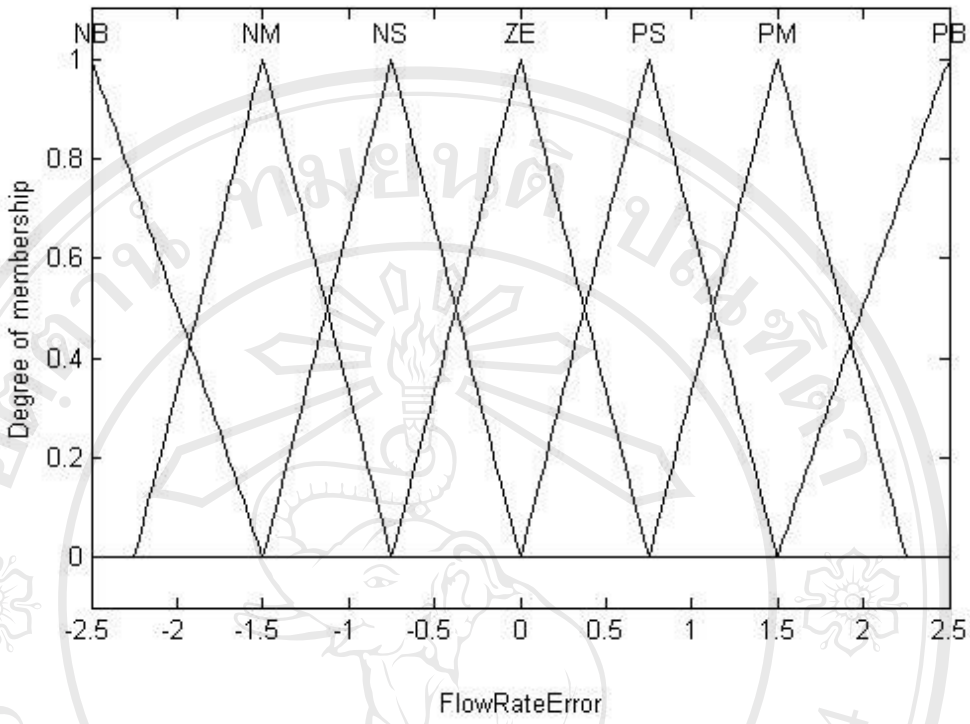
MF4='NS':'trimf',[-1.5 -0.75 0]

MF5='ZE':'trimf',[-0.75 0 0.75]

MF6='PS':'trimf',[0 0.75 1.5]

MF7='PB':'trimf',[1.493 2.492 4.493]

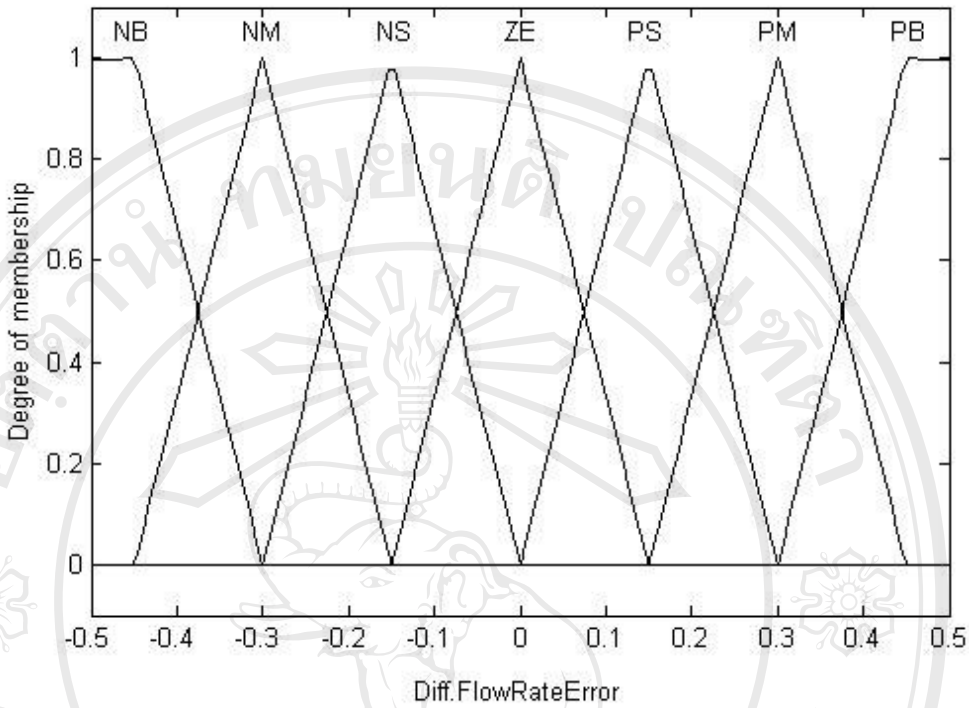
แสดงลักษณะความเป็นสมาชิก ดังรูปที่ ซ.2



รูป ซ.2 แสดงฟังก์ชั่นสมาชิกของตัวแปรอินพุท อัตราการไหลคลาดเคลื่อน

3. การกำหนดรูปแบบค่าความเป็นสมาชิก ของตัวแปรอินพุท "การเปลี่ยนแปลง ของอัตราการไหลคลาดเคลื่อน"

```
[Input2]
Name='Diff.FlowRateError'
Range=[-0.6 0.6]
NumMFs=7
MF1='NB':'trimf',[-10 -0.45 -0.3]
MF2='NM':'trimf',[-0.45 -0.3 -0.15]
MF3='PB':'trimf',[0.3 0.45 10]
MF4='NS':'trimf',[-0.3 -0.15 0]
MF5='ZE':'trimf',[-0.15 0 0.15]
MF6='PS':'trimf',[0 0.15 0.3]
MF7='PM':'trimf',[0.15 0.3 0.45]
```



รูป ซ.3 แสดงฟังก์ชั่นสมาชิกของตัวแปรอินพุท การเปลี่ยนแปลง ของอัตราการไหลคลาดเคลื่อน

4. การกำหนดรูปแบบค่าความเป็นสมาชิก ของตัวแปรเอาท์พุท "ความถี่"

[Output1]

Name='Frequenzy'

Range=[47 51.5]

NumMFs=5

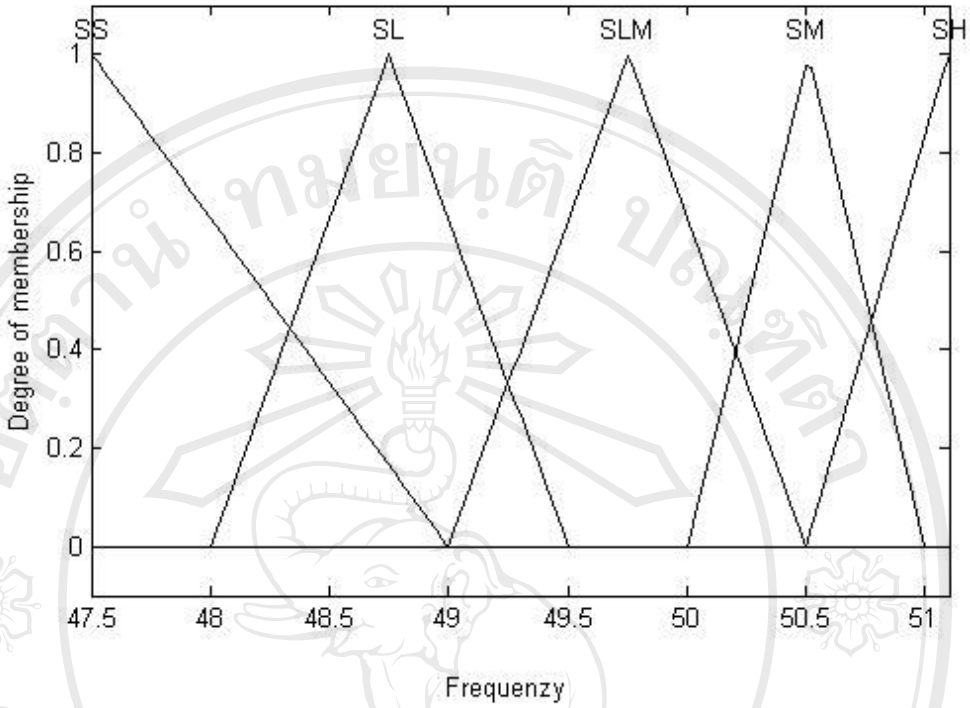
MF1='SS':'trimf',[10 47.5 49]

MF2='SL':'trimf',[48 48.75 49.5]

MF3='SH':'trimf',[50.5 51.1 90]

MF4='SM':'trimf',[50 50.5121145374449 51]

MF5='SLM':'trimf',[49 49.7522026431718 50.5]



รูป ซ.4 แสดงฟังก์ชั่นสมาชิกของตัวแปรเอาท์พุทความถี่

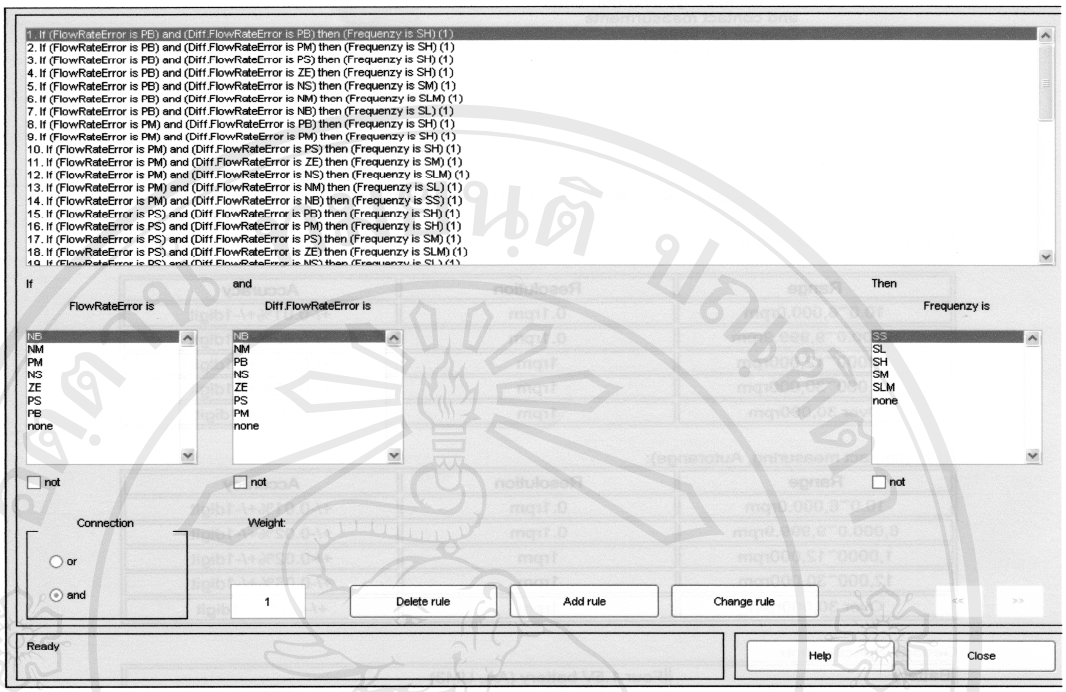
5. กำหนดฐานกฎของฟัซซี่

[Rules]

1. If Flow Rate Error is PB and Diff. Flow Rate Error is PB then Frequency is SH
2. If Flow Rate Error is PB and Diff. Flow Rate Error is PM then Frequency is SH
3. If Flow Rate Error is PB and Diff. Flow Rate Error is PS then Frequency is SH
4. If Flow Rate Error is PB and Diff. Flow Rate Error is ZE then Frequency is SH
5. If Flow Rate Error is PB and Diff. Flow Rate Error is NS then Frequency is SM
6. If Flow Rate Error is PB and Diff. Flow Rate Error is NM then Frequency is SLM

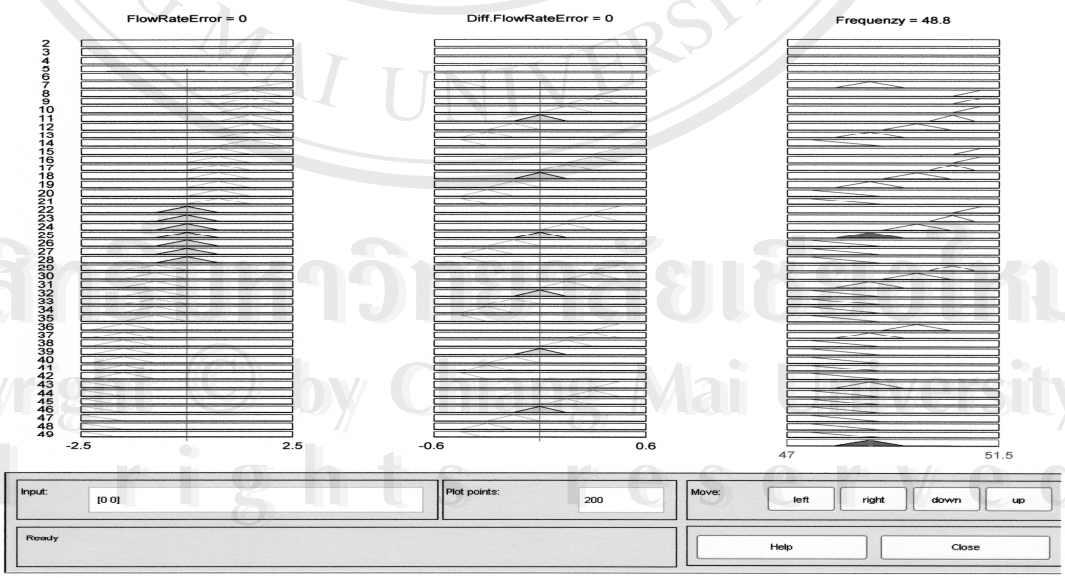
• •
• •
• •

48. If Flow Rate Error is NB and Diff. Flow Rate Error is NM then Frequency is SS
49. If Flow Rate Error is NB and Diff. Flow Rate Error is NB then Frequency is SS



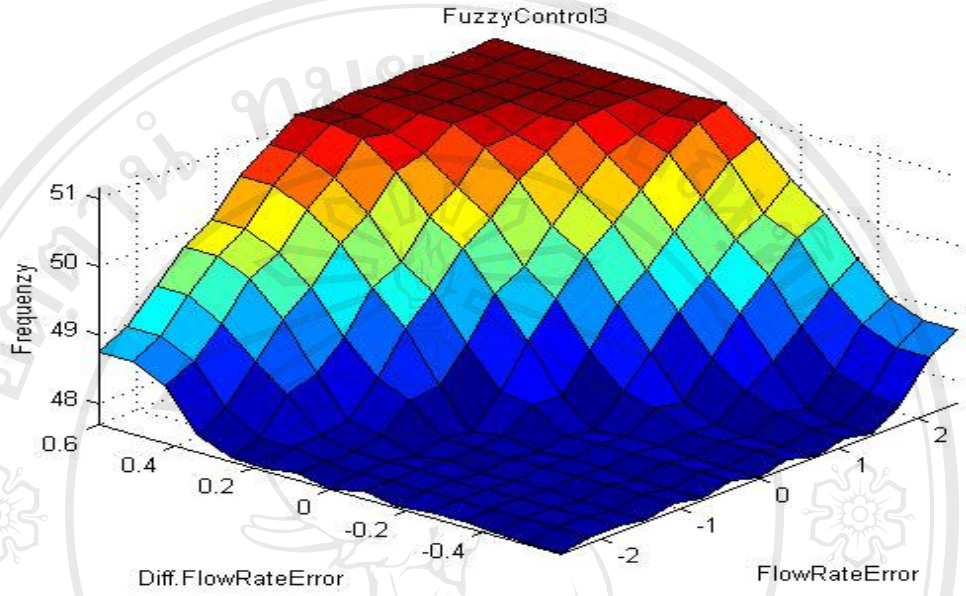
รูป ซ.5 แสดงหน้าต่างการกำหนดฐานกฎของฟัซซี่ ในซอฟแวร์ Fuzzy Logic Tool Box

6. ผลการแสดงนัยจากกฎ โดยใช้การดีฟัซซิฟิเคชั่น ด้วยวิธี CENTER-OF-AREAS หรือ CENTROID จะได้ดังนี้



รูป ซ.6 แสดงหน้าต่างผลการแสดงนัยจากกฎ ในซอฟแวร์ Fuzzy Logic Tool Box

7. สัญญาณควบคุมที่ได้ จากการออกแบบระบบควบคุม ที่ใช้การดีฟัซซิฟิเคชั่น ด้วยวิธี CENTER-OF-AREAS หรือ CENTROID



รูป ซ.7 แสดงสัญญาณควบคุมจากวิธี CENTER-OF-AREAS

8. การกำหนดรูปแบบการประมวลผลใหม่ เปลี่ยนหน่วยวินิจฉัย จากเดิมใช้วิธี CENTER-OF-AREAS มาเป็นใช้วิธี MEAN-OF-MAXIMA ในการแปลงผลลัพธ์ให้อยู่ในรูปของสัญญาณควบคุม โดยมีรูปแบบดังนี้

Name='FuzzyControl4'

Type='mamdani'

NumInputs=2

NumOutputs=1

NumRules=49

AndMethod='min'

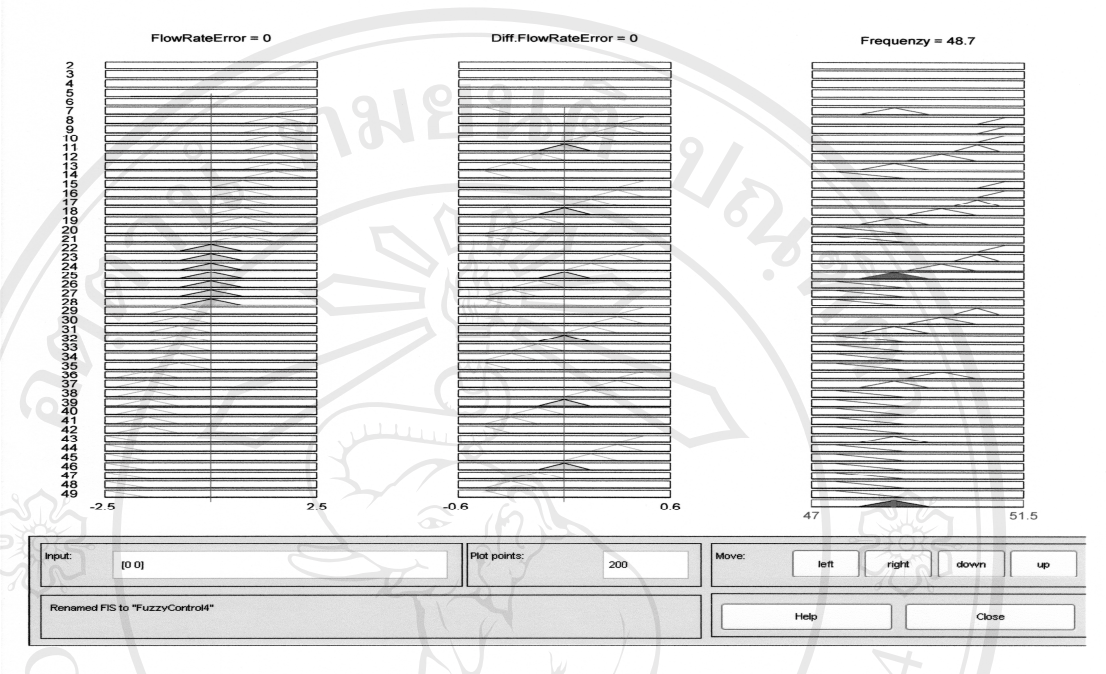
OrMethod='max'

ImpMethod='min'

AggMethod='max'

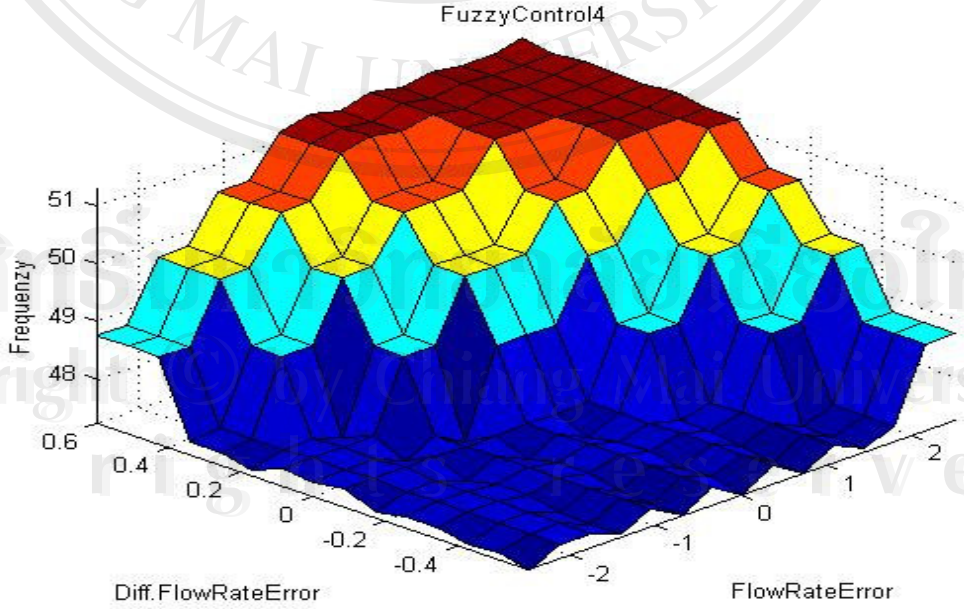
DefuzzMethod='mom'

9. ผลการแสดงนัยจากกฎใหม่ โดยใช้การดีฟัซซิฟิเคชั่น ด้วยวิธี MEAN-OF-MAXIMA หรือ MOM ได้ผลดังนี้



รูป ซ.8 แสดงหน้าต่างผลการแสดงนัยจากกฎใหม่ ในซอฟแวร์ Fuzzy Logic Tool Box

10. สัญญาณควบคุมที่ได้ จากการออกแบบระบบควบคุม ที่ใช้การดีฟัซซิฟิเคชั่น ด้วยวิธี MEAN-OF-MAXIMA หรือ MOM



รูป ซ.9 แสดงสัญญาณควบคุมจากวิธี MEAN-OF-MAXIMA

ภาคผนวก ฌ

รายการคำนวณค่าความเร็วการไหลวิกฤติ ของน้ำยิปซัม

1. การคำนวณค่าความเร็วสุดท้าย ของอนุภาคยิปซัม

จากสมการของ Nian-Sheng Cheng (1997)

$$\frac{w_m}{w} = \frac{2-2C_v}{2-3C_v}\left(\frac{\sqrt{25+1.2\left(d_*^{/}\right)^2}-5}{\sqrt{25+1.2\left(d_*\right)^2}-5}\right)^{1.5} \qquad \text{..... (ฌ.1)}$$

โดย $d_* = \left[(s-1)g/\nu^2\right]^{\frac{1}{3}} d_s$ ..... (ฌ.2)

$$d_*^{/} = \left\{\frac{\frac{(1-C_v)(s-1)}{[1+C_v(s-1)]}g}{(\nu^{/})^2}\right\}^{\frac{1}{3}} d_s \qquad \text{..... (ฌ.3)}$$

และ $w \times \frac{d_s}{\nu} = \left(\sqrt{25+1.2\left(d_*\right)^2}-5\right)^{1.5}$ ..... (ฌ.4)

เมื่อ $\nu^{/} = \frac{2\nu}{2-3C_v}$

แทนค่า $s = 2.32, g = 9.81, \nu = 4.74\times10^{-7}, d_s = 45\times10^{-6}$ ลงในสมการที่ (ฌ.2)

คำนวณค่า $d_* = 1.7752$

แทนค่า $C_v = 0.358, s = 2.32, g = 9.81, \nu^{/} = 4.74\times10^{-7}, d_s = 45\times10^{-6}$ ลงในสมการที่ (ฌ.3)

คำนวณค่า $d_*^{/} = 1.3454$

แทนค่า $d_s = 45 \times 10^{-6}, \nu = 4.74 \times 10^{-7}, d_* = 1.7752$ ลงในสมการที่ (ฌ.4)

คำนวณค่า $w = 2.32$ mm. / sec.

แทนค่า $w = 0.00232, C_v = 0.358, d_* = 1.7752, d_*^{/} = 1.3454$ ลงในสมการที่ (ฌ.1)

คำนวณความเร็วสุดท้าย ของอนุภาคยิปซัม (w_m) ได้เท่ากับ 1.1432 มิลลิเมตรต่อ วินาที

2. การคำนวณค่าความเร็วการไหลวิกฤติ ของน้ำยิปซัม

จากสมการของ D. R. Kaushal, *et al.* (2002)

$$V_C = F_L \left\{ 2gD_i \left[\frac{(\rho_s - \rho_l)}{\rho_l} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \qquad \text{..... (ฌ.5)}$$

โดย $F_L = \dfrac{F_r}{\sqrt{2}}$ ..... (ฌ.6)

และ $F_r = \sqrt{2} \left\{ 2.0 + 0.30 \log_{10} \left(\dfrac{d_p}{D_i C_D} \right) \right\}$ ..... (ฌ.7)

โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของ Nian-Sheng Cheng (1997)

เมื่อ $C_D = \left[\left(\dfrac{32}{\left\{ \sqrt{25 + 1.2(d_*^{/})^2} - 5 \right\}^{1.5}} \right)^{\frac{1}{1.5}} + 1 \right]^{1.5}$ ..... (ฌ.8)

แทนค่า $d_*^{/} = 1.3454$ ลงในสมการที่ (ฌ.8) คำนวณค่า $C_D = 337.57$

แทนค่า $C_D = 337.57, D_i = 0.127, d_s = 45 \times 10^{-6}$ ลงในสมการที่ (ฌ.6) และ (ฌ.7)

คำนวณค่า $F_L = 0.2063$

แทนค่า $F_L = 0.2063, g = 9.81, D_i = 0.127, \rho_S = 2280, \rho_l = 983$ ลงในสมการที่ (ฌ.5)

คำนวณความเร็วการไหลวิกฤติ ของน้ำยิปซัม (V_C) ได้เท่ากับ 242.9 มิลลิเมตรต่อ วินาที

3. การคำนวณผลของการเหวี่ยง ที่กระทำต่ออนุภาคยิปซัม

จากหลักการ Hydrocyclone ของ สมรัตน์ มโนรส (2538) เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ภายใน Cyclone จะเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Z) กระทำต่ออนุภาค ในขณะที่มีแรงต้านทานการไหล (W) กระทำต่ออนุภาค ในทิศทางตรงกันข้าม หากแรงทั้งสองมีขนาดเท่ากัน อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นรอบรูป โดยไม่มีการตกตะกอน

สมรัตน์ มโนรส (2538) แสดงสมการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่กระทำต่ออนุภาค ดังนี้

$$Z = \frac{\Pi}{6} d_p^{\,3} \left(\rho_p - \rho_l\right) \frac{V_C^{\,2}}{r} \qquad \text{..... (ฌ.9)}$$

และสมการแรงต้านทานการไหล ที่กระทำต่ออนุภาคทรงกลม

$$W = \frac{\Pi}{4} C_D d_p^{\,2} \frac{\rho_l}{2} \overline{V}^2 \qquad \text{..... (ฌ.10)}$$

เมื่อแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เท่ากับแรงต้านทานการไหล จะได้สมการคำนวณ ความเร็วการไหลวิกฤติ ที่เกิดจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (สมรัตน์ มโนรส ,2538) ได้ตามสมการ

$$V_C^{\,2} = \frac{3}{4} \frac{C_D r}{d_p} \left(\frac{\rho_l}{\rho_p - \rho_l} \right) \overline{V}^2 \qquad \text{..... (ฌ.11)}$$

ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของ Nian-Sheng Cheng (1997) $C_D = 337.57$

แทนค่า

$C_D = 337.57, \rho = 983, \rho_P = 2280, r = 0.254, \overline{V} = 1.096$ *และ* $d_P = 45 x 10^{-6}$

ลงในสมการที่ (ฌ.11)

คำนวณค่า $V_C = 1.1406$

หรือ ความเร็วการไหลวิกฤติ ของอนุภาค จากผลของแรงเหวี่ยงเท่ากับ <u>1.1406</u> เมตรต่อ วินาที

ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วการไหลวิกฤติ ที่เกิดจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่คำนวณได้ กับความเร็วของน้ำยิปซัม ที่ค่าอัตราการไหล 50 ลูกบาศก์เมตร ต่อชั่วโมง สรุปได้ว่า อนุภาคยิปซัมขนาด 45 ไมโครเมตร จะไม่ได้รับผลจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เพราะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำกว่า ความเร็วการไหลวิกฤติจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง สำหรับ ผลการคำนวณที่อัตราการไหลอื่นๆ ในช่วงทดลอง แสดงในตารางที่ ฌ.1

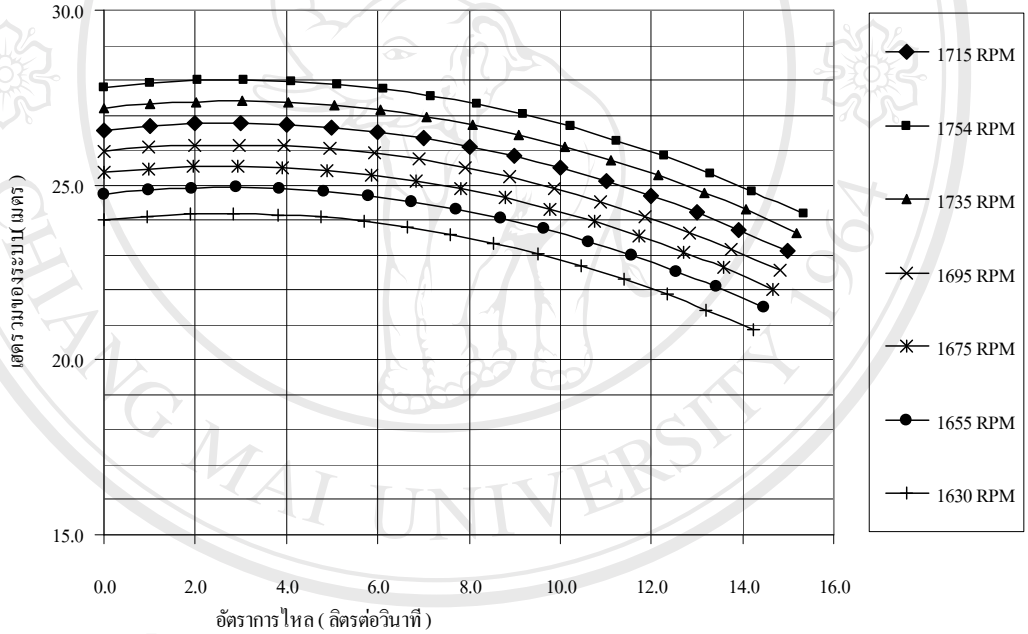
ตาราง ฌ.1 แสดงผลการคำนวณ ค่าความเร็วท้ายจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่ค่าอัตราการไหล 40 – 65 ลูกบาศก์เมตรชั่วโมง

ลำดับที่ No.	ค่า Drag Coeff. C_D	ขนาดอนุภาค d_p (m.)	ความหนาแน่นของเหลว ρ_l (kg / m^3)	ความหนาแน่นของแข็ง ρ_p (kg / m^3)	ตำแหน่งในข้องอ r (m.)	ค่าอัตราการไหล Q (m^3 / h)	ค่าความเร็วเฉลี่ย V (m / s)	ค่าความเร็วแนวรัศมี V_C (m / s)
1	337.57	0.000045	983	2280	0.254	40	0.8768	0.9125
2	337.57	0.000045	983	2280	0.254	45	0.9864	1.0265
3	337.57	0.000045	983	2280	0.254	50	1.0960	1.1406
4	337.57	0.000045	983	2280	0.254	55	1.2056	1.2546
5	337.57	0.000045	983	2280	0.254	60	1.3152	1.3687
6	337.57	0.000045	983	2280	0.254	65	1.4248	1.4827

ภาคผนวก ญ

ผลการคำนวณเวลาที่ระบบสูบน้ำยิปซัม ตอบสนองต่อการเปลี่ยนความเร็วรอบ

จากกราฟคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำยิปซัม ที่ได้จากการทดสอบ เมื่อทำการคำนวณตามค่าความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงจาก Affinity Laws ได้ดังกราฟข้างล่างนี้



การคำนวณหาช่วงเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่จุดสภาวะที่ใช้งาน (เริ่มจากหยุดนิ่ง t = 0 วินาที จนถึงอัตราการไหล 13.9 ลิตรต่อวินาที) เมื่อไม่สนใจคลื่นความดัน และพิจารณาเพียงความเร่งเฉลี่ยของน้ำยิปซัมในระบบท่อ

จาก $\Delta v = a\Delta t$ และ $\Delta v = \dfrac{\Delta Q}{A}$ ..... (ญ.1)

ดังนั้น

$$a = \frac{\Delta Q}{A\Delta t}$$ ..... (ญ.2)

ถ้าพิจารณา ช่วงอัตราการไหล 2 ลบ.ม.ต่อชั่วโมง ณ จุดสภาวะที่ใช้งาน (ที่ค่าอัตราการไหล 50 ลบ.ม.ต่อชั่วโมง) จะแบ่งได้เป็น 25 ช่วง แทนค่าลงในสมการ (ญ.2)จะได้

$$a = \frac{16.2999}{\Delta t} \qquad \text{..... (ญ.3)}$$

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน $F = ma$ ..... (ญ.4)

และแรงที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ จากความดัน $F = PA$ ..... (ญ.5)

เมื่อ $P = \rho gh$, $\rho = \frac{m}{V}$ และ $V = AL$ แทนลงในสมการ (ญ.4) และ (ญ.5)

จะได้ความสัมพันธ์

$$aL = hg \qquad \text{..... (ญ.6)}$$

แทนค่า $L = 168.6m.$ และ $g = 9.81m/s^2$ ลงในสมการ (7.17) จะได้

$$\frac{16.2999}{\Delta t} x168.6 = 9.81xh \quad \text{หรือ} \quad \Delta t = \frac{280.14}{h} \qquad \text{..... (ญ.7)}$$

ทำการคำนวณโดยแทนค่าเฮด (h)ที่ค่าอัตราการไหล ตั้งแต่ 0 ลบ.ม.ต่อวินาที จนถึง 50 ลบ.ม.ต่อวินาที ลงในสมการที่ (ญ.7) จะมีเวลาที่คำนวณได้ทั้งหมด 26 ค่า (ที่ความเร็วเครื่องสูบน้ำคงที่ค่าหนึ่ง) เช่น ที่ความเร็วรอบ 1,715 รอบต่อนาทีได้ค่าดังนี้

10.54 10.51 10.49 10.48 10.47 10.46 10.47 10.47 10.49 10.51 10.54 10.57 10.61 10.65 10.71 10.77 10.83 10.91 10.99 11.08 11.17 11.28 11.40 11.52 11.66 และ 11.80 ตามลำดับ

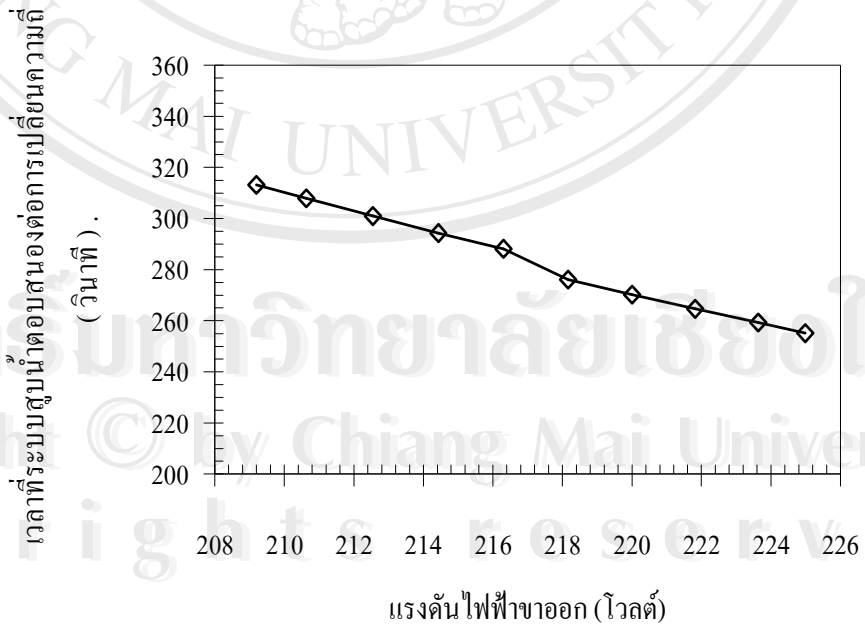
นำเวลาที่ค่าเฮดแต่ละค่า มาหาเวลาเฉลี่ย ในแต่ละช่วง ได้ทั้งหมด 25 ค่า คือ

10.53 10.50 10.48 10.47 10.46 10.46 10.47 10.48 10.50 10.52 10.55 10.59 10.63 10.68 10.74 10.80 10.87 10.95 11.03 11.13 11.23 11.34 11.46 11.59 และ 11.73

ผลรวมของเวลาทั้งหมด เป็นเวลาที่เครื่องสูบน้ำเริ่มจากหยุดนิ่ง จนถึงค่าอัตราการไหลที่ต้องการ เท่ากับ 270.19 วินาที สำหรับข้อมูล ของเวลาตอบสนองต่อค่าความเร็วรอบในช่วงใช้งาน แสดงข้อมูลตามตารางที่ ญ.1 และนำผลที่ได้มาแสดงความสัมพันธ์ แสดงดังกราฟรูปที่ ญ.1

ตาราง ญ.1 แสดงผลการคำนวณ เวลาที่สายพานแยกน้ำออกจากยิปซัม ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ ของเครื่องสูบน้ำยิปซัม

ความเร็วของเครื่องสูบน้ำ (รอบต่อนาที)	ความเร็วมอเตอร์ที่คำนวณได้ (รอบต่อนาที)	ความถี่ (เฮิร์ทซ)	แรงดัน (โวลต์)	เวลาที่ระบบสูบน้ำยิปซัมตอบสนองต่อการเปลี่ยนความเร็วรอบ(วินาที)
1754	1533	51.1	225.0	255.1
1743	1525	50.8	223.6	259.3
1729	1512	50.4	221.8	264.6
1715	1500	50.0	220.0	270.2
1701	1487	49.6	218.2	276.0
1686	1475	49.2	216.3	288.2
1672	1462	48.7	214.4	294.3
1657	1449	48.3	212.5	301.0
1642	1436	47.9	210.6	307.9
1631	1425	47.5	209.2	313.1



รูป ญ.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลาที่ระบบสูบน้ำยิปซัม ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ไฟฟ้า และแรงดันขาออกที่ป้อนให้แก่มอเตอร์

ภาคผนวก ฎ

ผลงานนำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

ใบตอบรับ เข้าร่วมนำเสนอบทความทางวิชาการ และบทความที่นำเสนอ

ที่ ศธ 0515(09).2/ 0903

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ
อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

6 มิถุนายน 2548

เรื่อง ตอบรับการประชุมวิชาการ
เรียน คุณเฉลิมเกียรติ สวรรค์วงศ์

สิ่งที่ส่งมาด้วย 1. สำเนาการขออนุมัติจัดประชุมวิชาการ
2. โปรแกรมการจัดประชุม

ตามที่ ท่านได้ส่งบทความ เพื่อเข้าร่วมการประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 4) วันที่ 4–5 กรกฎาคม 2548 ณ โรงแรม โกลเด้นท์ไพน์รีสอร์ท อ.เมือง จ.เชียงราย บัดนี้ทางคณะกรรมการขอยินดีแจ้งให้ทราบว่า บทความของท่านได้รับการอนุมัติให้นำเสนอในการประชุมครั้งนี้แล้ว

ในการนี้ ผู้เข้าร่วมประชุมที่มาจากส่วนราชการต่างๆ ที่ได้รับอนุมัติจากผู้บังคับบัญชาแล้ว สามารถเข้าประชุมโดยไม่ถือเป็นวันลา และมีสิทธิ์เบิกค่าใช้จ่ายในการเดินทางได้ตามระเบียบของทางราชการจากต้นสังกัด

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์)
ประธานคณะกรรมการจัดการประชุม

คุณลักษณะของการวัดการไหลด้วยเครื่องวัดแบบข้องอ สำหรับน้ำยิปซัม ในระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 8-11

CHARACTERISTICS OF FLOW MEASUREMENT USING ELBOW METER FOR GYPSUM SLURRY IN FLUE GAS DESULPHURIZATION SYSTEM MAE MOH POWER PLANT UNIT 8-11

เฉลิมเกียรติ สวรรค์วงศ์
แผนกบำรุงรักษาอุปกรณ์เครื่องกล
ระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
กองบำรุงรักษาโรงไฟฟ้าแม่เมาะ 1
ฝ่ายบำรุงรักษาโรงไฟฟ้าแม่เมาะ
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง 52220
โทรศัพท์ 0-5425-3182
โทรสาร 0-5425-3188
Email: Chalermkiat.S@egat.co.th

ตะวัน สุจริตกุล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
อ. เมือง จ. เชียงใหม่ 50200
โทรศัพท์ 0-5394-4140 โทรสาร 0-5394-4145
Email: Tawan@dome.eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณลักษณะ ของการวัดการไหลด้วยข้องอ ซึ่งเป็นวิธีการวัดที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูงมาก แต่มีการติดตั้งและใช้งานง่าย เพื่อให้ได้คุณลักษณะที่สมบูรณ์ ในการนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำยิบซัม ในระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 8 – 11 โดยใช้ข้องอมาตรฐาน 90 องศา ขนาด 125 มิลลิเมตร ติดตั้งด้านหลังเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง ที่ให้สภาวะการไหลเข้าข้องอแบบปั่นป่วน และในระบบท่อทั้งแนวดิ่งและแนวราบ ที่ให้สภาวะการไหลเข้าข้องอแบบพัฒนาเต็มที่ ด้วยค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ 2,000 ถึง 3,500 มีจุดวัดความดันแตกต่าง ที่มีรูด้านหนึ่งอยู่บนผนังโค้งด้านใน ส่วนอีกรูหนึ่งอยู่บนผนังโค้งด้านนอก ในแนวที่แกนทำมุม 22.5 30 37.5 และ 45 องศา ตามลำดับ กับระนาบไหลเข้าข้องอ น้ำยิปซัมมีความเข้มข้น 51 54 และ 57 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก พบว่า ตำแหน่งติดตั้งข้องอ รวมทั้งความเข้มข้น ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าความดันแตกต่างคร่อมจุดวัด และค่าสัมประสิทธิ์ของข้องอ จุดวัดความดันที่แกนทำมุม 45 องศา ให้ค่าความดันแตกต่างสูงที่สุด และให้ค่าใกล้เคียงกัน เมื่อกลับทิศทางการไหล สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความดันแตกต่าง และค่าสัมประสิทธิ์ของข้องอ ได้มาจากการวิเคราะห์ ด้วยวิธีสหสัมพันธ์แบบยกกำลัง และสามารถทำนายผลการทดลองได้เป็นอย่างดี

Abstract

This research studies characteristic of flow measurement using elbow that the high accuracy is not required. However, it should be easy to install and operate. The device will be applied for gypsum slurry measurement in Flue Gas Desulfurization System at Mae Moh power plant unit 8-11. Therefore, full characteristic study is necessary.

The experimental begins by installing a 90 degree standard elbow near the outlet of the centrifugal pump which causes the turbulent inlet flow through the installed elbow while the vertical and horizontal plane has fully developed the flow with 2,000 – 3,500 of Reynolds number. Pressure taps (that consists of 2 holes: the first hole is on the internal wall and another one is on the external wall) were located on the elbow at 22.5, 30, 37.5, and 45 degree on the curvature radius respectively.

After study the gypsum slurry which its concentration is at 51 %, 54%, and 57% by weight, we found that elbow position and concentration has small effect to pressure gradient and elbow coefficient. There is a largest pressure gradient when pressure tap is at 45 degree and the same as reserve flow direction. The equations developed from result can predict pressure gradient and elbow coefficient agree well with experiment data.

บทนำ

โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 8-11 ติดตั้งระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ใช้กระบวนการทางเคมี ดึงก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกมาจากแก๊สเสีย (Flue Gas) โดยใช้น้ำหินปูนเป็นวัตถุดิบ ได้น้ำยิปซัมเป็นผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์ในระบบลำเลียงน้ำยิปซัมเสียหายด้วยความถี่สูง เนื่องจากไม่ได้ติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหล ทำให้การควบคุมระบบทำได้ยากและอุปกรณ์ทำงานไม่ต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องหาเครื่องวัดอัตราการไหล ที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบเดิม มาติดตั้งใช้งาน ซึ่งเครื่องวัดการไหลแบบข้องอ น่าจะมีความเหมาะสม เพราะมีการออกแบบติดตั้งใช้งานง่าย ราคาถูก การสอบเทียบทำได้ง่าย สามารถติดตั้งแทนที่ข้องอ ที่มีในระบบท่อได้ทันที และไม่มีปัญหาเรื่อง การสะท้อนและดูดซับคลื่น ของท่อที่ทำจากไฟเบอร์กลาส ดังเช่นเครื่องวัดอัตราการไหล แบบคลื่นอัลตร้าโซนิค (Ultrasonic Flow Meter) หรือแบบคลื่นแม่เหล็ก (Magnetic Flow Meter) แต่เนื่องจาก ยังขาดผลการศึกษาถึงคุณลักษณะของเครื่องวัดการไหล เมื่อนำมาใช้กับของผสม จึงเป็นที่มาของงานวิจัย เพื่อให้รู้คุณลักษณะที่สมบูรณ์ของเครื่องมือวัดชนิดนี้ เมื่อนำมาใช้กับน้ำยิปซัม ในระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 8-11 และนำไปสู่หนทางการแก้ไขการควบคุมระบบ และอุปกรณ์ในอนาคต

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวัดการไหลด้วยข้องอ ใช้หลักการความดันสถิตที่แตกต่างกัน ระหว่างจุดวัดสองตำแหน่ง คร่อมข้องอ เมื่อของไหลถูกบังคับให้เปลี่ยนทิศทางการไหล ภายในข้องอ ผลจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง จะกระตุ้นของไหลในบริเวณกลางท่อ ให้เคลื่อนที่ไปยังผนังด้านนอก ในขณะที่ของไหลที่อยู่บริเวณผนัง จะเคลื่อนที่สลับเข้ามาอยู่บริเวณกลางท่อแทนด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าความดัน แตกต่างกันตามตำแหน่งในแนวรัศมีของข้องอ ค่าความดันสถิตสูงสุด จะอยู่ที่ผนังโค้งด้านนอก และค่าต่ำสุดจะอยู่ที่ผนังโค้งด้านใน [Murdock et.al, 1963] การคำนวณค่าอัตราการไหลเชิงทฤษฎี สำหรับของผสมที่มีคุณสมบัติเนื้อเดียว Colwell and Shook (1989) ได้เสนอสมการ ที่ประยุกต์มาจากพื้นฐานสมการของเบอร์นูลลีย์ โดยมีสมมติฐานว่า มีการไหลแบบอยู่ตัว (Steady Flow) สภาวะคงตัว (Steady State) และความหนาแน่นคงที่ตลอดหน้าตัด

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \qquad (1)$$

และจากกฎทรงมวล ; $Q_V = AV$ ดังนั้น

$$Q_V = C_e \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \qquad (2)$$

ค่าอัตราการไหลที่แท้จริงมักจะน้อยกว่าค่าอัตราการไหลเชิงทฤษฎี เนื่องจากสภาวะการไหล รูปแบบการกระจายของความเร็ว ความหนืดที่เพิ่มขึ้น และการสูญเสียพลังงานในการไหล ซึ่งไม่เป็นไปตามสมมติฐาน สมการเชิงทฤษฎีจึงถูกแก้ไขด้วย การคูณค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient, C_e) ที่เป็นผลจากปัจจัยต่างๆ เช่น จุดวัดความดัน และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ [Miller, 1996]

ค่าสัมประสิทธิ์ของข้องอที่มีสัดส่วนรัศมีความโค้งต่อขนาดท่อ 1.5 : 1 จุดวัดความดันที่แกนทำมุม 45 องศา กับแกนหน้าตัดไหลเข้าข้องอ ใช้กับน้ำ Murdock et.al (1963) และ Indian Standard IS : 9115 (1979) ได้ค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0.86 ทำนายค่าอัตราการไหลได้แม่นยำ $\pm$ 4 และ $\pm$ 5 % ตามลำดับ เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ มากกว่า 50,000 ขึ้นไป และหากค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ต่ำกว่านี้ ค่าสัมประสิทธิ์จะลดลงตามค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ในกรณีของ ของผสม Colwell and Shook (1989) แนะนำให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ เท่ากับ 0.76 โดยที่ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ มากกว่า 4,000 จะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ น้อยกว่า 4,000

จุดวัดค่าความดันแตกต่าง ที่แกนทำมุมกับแกนหน้าตัดไหลเข้าข้องอ สัมพันธ์กับค่าความดันแตกต่าง โดย Smith (1971) พบว่า ค่าความดันแตกต่าง ระหว่างผนังด้านในและด้านนอก ของข้องอหน้าตัดเหลี่ยม มีค่าสูงที่แกนทำมุมกับแกนหน้าตัดไหลเข้าข้องอ 18 ถึง 45 องศา

ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดการไหล มีผลต่อรูปแบบการไหลเข้าข้องอ สำหรับน้ำ Murdock et.al (1963) Toda et.al (1972) และ Silva et.al (1997) ติดตั้งข้องอในตำแหน่งที่มีการไหลเข้า และออกแบบพัฒนาเต็มที่ (Fully Develop Flow) พบว่า จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ดีกว่า ข้องอที่มีการไหลเข้าแบบปั่นป่วน ในกรณีของของผสม Colwell and Shook (1989) ติดตั้งข้องอ ในตำแหน่งที่มีการไหลเข้าแบบปั่นป่วน โดยอยู่ติดกับท่อด้านส่งของเครื่องสูบน้ำ เพื่อให้การไหลเป็นแบบเนื้อเดียว มีการกระจายของ ของแข็งสม่ำเสมอ ตลอดหน้าตัดการไหล

สำหรับการทดลองนี้ จะนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันแตกต่างคร่อมจุดวัดความดัน ในรูปตัวแปรไร้หน่วย โดยนิยามค่าเป็นปัจจัยความดันแตกต่าง ดังนี้

$$f_P = \frac{\rho \Delta P}{G_c^2} \qquad (3)$$

ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (R_{ed}) เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัมโดยน้ำหนัก (S) มุมของจุดวัดความดันที่แกนทำมุมกับแกนหน้าตัดไหลเข้าข้องอเทียบกับมุมของข้องอ (P_A) และตำแหน่งติดตั้งข้องอ (M_P) รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของเครื่องวัดการไหลแบบข้องอ กับตัวแปรต่างๆ ข้างต้น

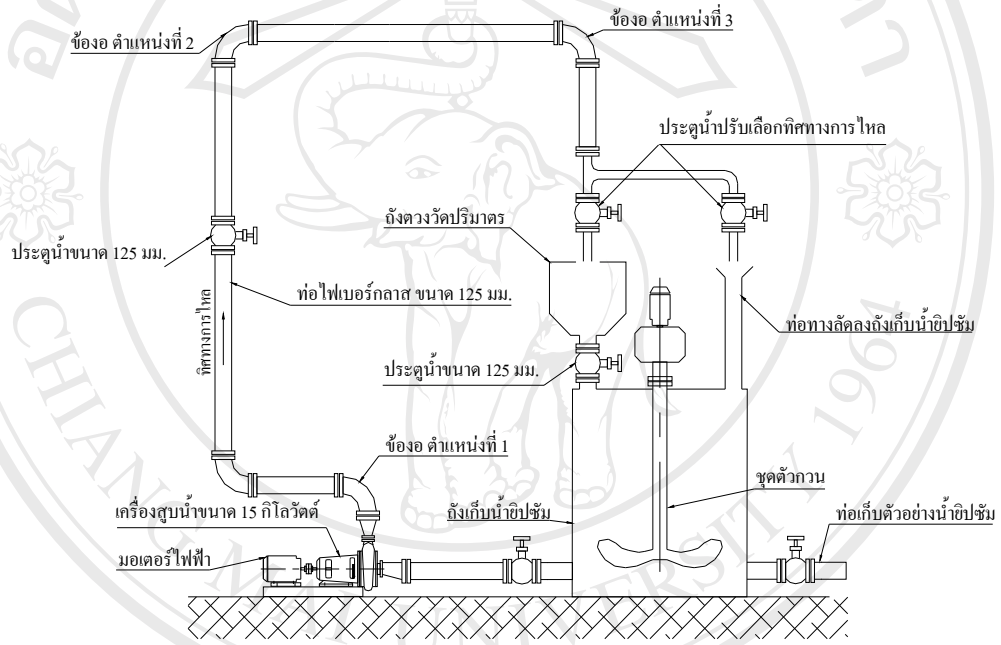
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

จากแผนภาพของชุดท่อทดลอง ในรูปที่ 1 ประกอบด้วย ถังสะสมน้ำยิปซัมความจุ 160 m^3 ติดตั้งใบกวนเพื่อป้องกันการ

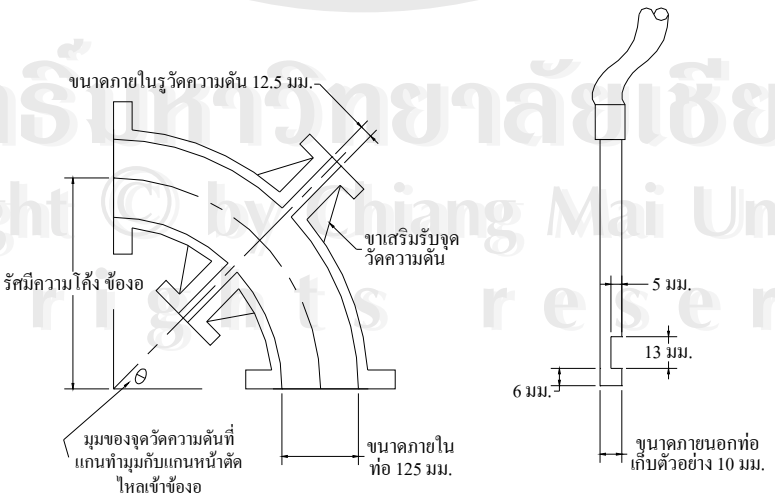
ตกตะกอน มีเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขนาด 15 kW สูบถ่ายน้ำยิปซัมจากถังสะสมได้ในอัตรา 10 -18 l/s ปรับอัตราการไหลโดยเปลี่ยนความเร็วรอบ และบังคับประตูน้ำด้านส่ง วัดค่าอัตราการไหลด้วยความแม่นยำ ± 0.07 l/s และไหลกลับลงสู่ถังสะสม น้ำยิปซัมมีอุณหภูมิประมาณ 60 °C ส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าความหนืด ด้วยเครื่อง Viscometer DV II+ ได้ค่าความหนืดก่อนและหลังทดลอง 75.9 ± 0.75 และ 75.8 ± 0.96 cP ตามลำดับ ระบบท่อทำจากไฟเบอร์กลาส ผลิตตามมาตรฐาน DIN 16966 Part 2 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 125 mm. หุ้มด้วยฉนวนหนา 50 mm. ตลอดความยาวท่อ

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบข้องอ มีขนาดและผลิตตามมาตรฐานเดียวกับท่อ เป็นข้องอ 90 องศา มีสัดส่วนรัศมีความโค้งน้ำยิปซัมจะไหลผ่านเครื่องวัดการไหลแบบข้องอ และระบบท่อ ลงสู่ถังตวงวัดปริมาตร ออกแบบตามมาตรฐาน ISO 8316 : 1987

ต่อขนาดท่อ 1.5 : 1 ติดตั้ง 3 ตำแหน่งดังรูปที่ 1 โดยตำแหน่งที่ 1 อยู่ติดกับท่อด้านส่งของเครื่องสูบน้ำ ตำแหน่งที่ 2 และ 3 ติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่มีระยะท่อตรงก่อนเข้า และหลังออกข้องอไม่น้อยกว่า 20 เท่าของขนาดท่อ ยกเว้นท่อตรงหลังออกข้องอในตำแหน่งที่ 3 มีระยะเพียง 5 เท่าของขนาดท่อ เจาะรูวัดความดันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 12.5 mm. บนผนังข้องอ ในแนวที่แกนทำมุม 22.5 30 37.5 และ 45 องศากับแกนหน้าตัดไหลเข้าข้องอ ดังแสดงในรูปที่ 2



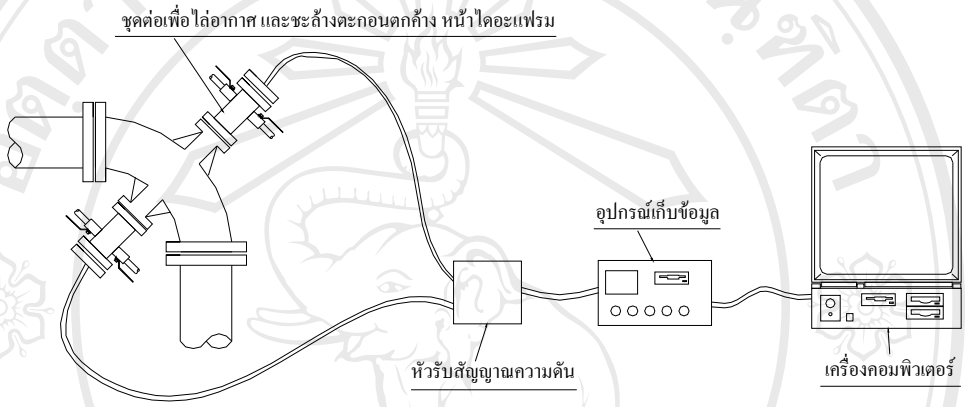
รูปที่ 1 แสดงแผนภาพของระบบท่อ อุปกรณ์ และตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดการไหลแบบข้องอ ในชุดท่อทดลอง



รูปที่ 2 แสดงภาพตัดของเครื่องวัดการไหลแบบข้องอ และท่อเก็บตัวอย่างน้ำยิปซัม ที่สอดเข้าไปในจุดวัดความดัน

ความหนาแน่นของน้ำยิปซัมที่ใช้ มีค่าประมาณ 1,380 1,420 และ 1,450 kg /m^3 หาค่าด้วยวิธี KRC Application Pursuant to German and International Standards ด้วยความแม่นยำ ± 29.64 kg /m^3 ซึ่งเทียบเท่ากับความเข้มข้น 51 54 และ 57 % โดยน้ำหนัก จากการสุ่มตัวอย่างน้ำยิปซัมในถังสะสม ทั้งก่อนและหลังการทดลอง รวมทั้งใช้ท่อเก็บตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2 สอดเข้าไปในรูจุดวัดความดัน ที่ระยะ 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 0.9 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน นับจากผิวโค้งด้านใน ของข้องอออกมา

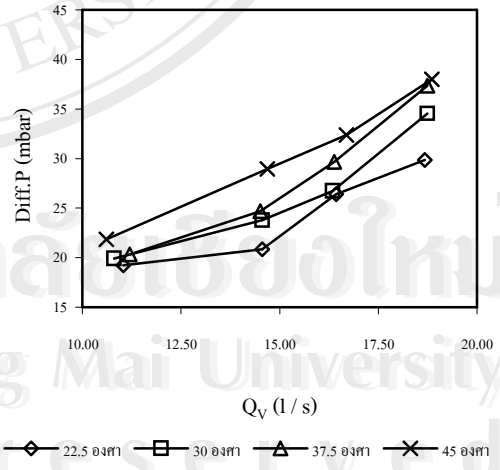
วัดค่าความดันแตกต่างด้วย Differential Pressure Transmitter ชนิด Piezoelectric Sensor และ Diaphragm Remote Seal ยี่ห้อ ABB มีความแม่นยำ ± 0.34 mbar ต่อกับจุดวัดความดันคั่นด้วยชุดระบายอากาศ และชะล้างตะกอนตกค้าง แสดงในรูปที่ 3 อ่านและบันทึกค่าความดันด้วย Paperless Chart Recorder รุ่น Minitrend ยี่ห้อ Penny + Giles ก่อนเริ่มดำเนินการทดลอง จะมีการหมุนเวียนการไหล ช่วงระยะเวลาหนึ่ง เพื่อไล่อากาศออกจากระบบท่อ และรอจนกระทั่ง ระดับของน้ำยิปซัมภายในถังสะสมคงที่



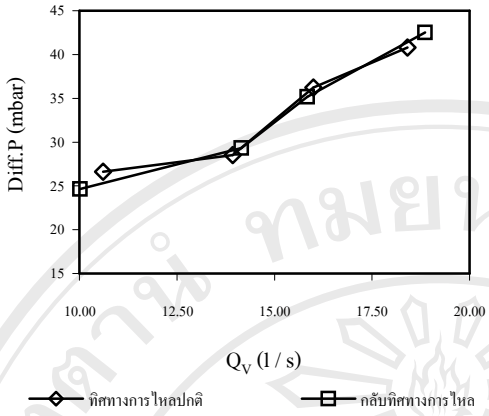
รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งเครื่องอ่าน และบันทึกค่าความดันแตกต่าง กับชุดระบายอากาศ และชะล้างตะกอนตกค้าง

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

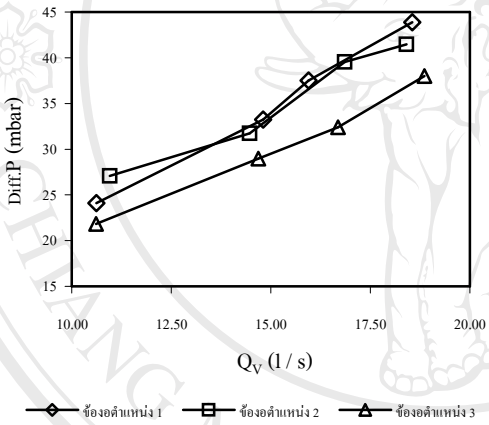
ผลการทดลองแสดงในลักษณะกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างความดันแตกต่าง คร่อมจุดวัดความดัน และค่าอัตราการไหล ในรูปที่ 4 แสดงผลของข้องอ ที่มีจุดวัดความดันที่แกนทำมุมต่างๆ กับหน้าตัดไหลเข้าข้องอ พบว่า ค่าความดันแตกต่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราการไหล เมื่อเทียบที่ค่าอัตราการไหลเดียวกัน มุมของจุดวัดความดันเพิ่มขึ้น ค่าความดันแตกต่างก็จะเพิ่มขึ้นตาม และมีค่ามากที่สุดที่มุม 45 องศา ซึ่งใกล้เคียงกับรายงานในเอกสารของ Indian Standard IS : 9115 (1979) และ Smith (1971) ในรูปที่ 5 แสดงผล เมื่อมีการกลับทิศทางการไหลเข้าข้องอ สำหรับข้องอที่มีจุดวัดความดันที่แกนทำมุม 45 ± 3 องศา เทียบค่าความดันแตกต่าง ที่ค่าอัตราการไหลเดียวกัน พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยแตกต่างกันไม่เกิน 3.7 % จากกราฟรูปที่ 6 แสดงผลเปรียบเทียบตามตำแหน่งติดตั้งข้องอ พบว่า ข้องอติดตั้งในตำแหน่งที่ 1 และ 2 ค่าความดันแตกต่าง ที่ค่าอัตราการไหลเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกัน แตกต่างกันมากที่สุดไม่เกิน 5.7 % แต่มีค่าแตกต่างจากตำแหน่งที่ 3 มากโดยคาดว่าจะเกิดจาก สภาวะการไหลที่แตกต่างกันในรูปที่ 7 แสดงการกระจายของความหนาแน่นตลอดหน้าตัดการไหล ที่จุดวัดความดันมุม 45 องศา พบว่า ในข้องอตำแหน่งที่ 1 และ 2 มีการไหลเป็นแบบเนื้อเดียว (Pseudo-homogeneous) มีการกระจายของ ของแข็งภายในข้องอสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดการไหล ส่วนข้องอในตำแหน่งที่ 3 มีการไหลแบบหลายเนื้อ (Heterogeneous)



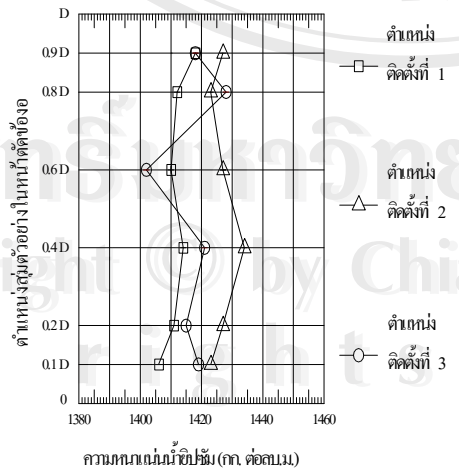
รูปที่ 4 แสดงผลของมุมจุดวัดความดัน ต่อค่าความดันแตกต่างคร่อมจุดวัดความดัน



รูปที่ 5 แสดงผลเปรียบเทียบค่าความดันแตกต่าง เมื่อมีการกลับทิศทางการไหล ของจุดวัดความดันที่มุม 45 องศา

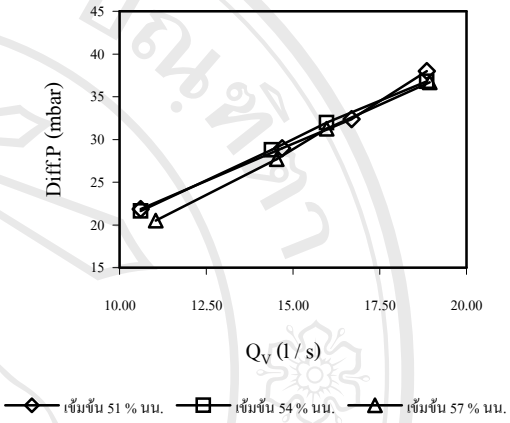


รูปที่ 6 แสดงผลตำแหน่งติดตั้งข้องอ ต่อค่าความดันแตกต่าง



รูปที่ 7 แสดงการกระจายความเข้มข้น ในหน้าตัดข้องอ เปรียบเทียบตามตำแหน่งติดตั้งข้องอ

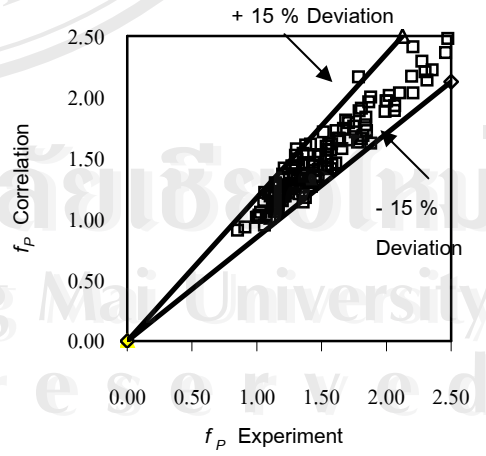
สำหรับผลของเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม แสดงในรูปที่ 8 พบว่าที่ค่าอัตราการไหลเดียวกัน ค่าความดันแตกต่างมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าความดันแตกต่างกันไม่เกิน 8.7 % ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Colwell and Shook (1986) แต่ในเอกสารนี้มีความแตกต่างน้อยกว่า เพราะช่วงเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ใช้แคบกว่า



รูปที่ 8 แสดงผลเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม ต่อค่าความดันแตกต่าง คร่อมจุดวัดความดัน

เมื่อนำข้อมูล มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างค่าปัจจัยความดันแตกต่าง และตัวแปรอิสระอื่นๆ ด้วยวิธีสหสัมพันธ์ แบบยกกำลัง จะได้สมการทำนายค่าปัจจัยความดันแตกต่าง ดังนี้

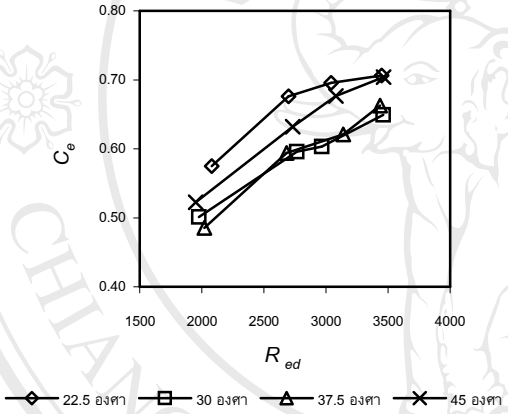
$$f_p = 8{,}805.5(R_{ed}^{-1.0035})(S^{-0.4719})(P_A^{-0.0940})(M_P^{0.3417}) \quad (4)$$



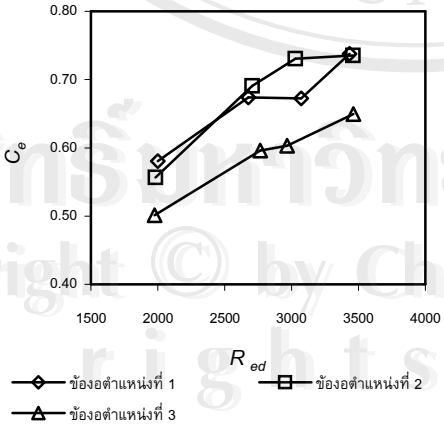
รูปที่ 9 แสดงผลเปรียบเทียบ ระหว่างปัจจัยความดันแตกต่าง จากความสัมพันธ์ และจากผลการทดลอง

จากรูปที่ 9 พบว่าสมการดังกล่าว สามารถทำนายค่าความดันแตกต่าง ได้ครอบคลุมข้อมูล 95.1 % ของผลการทดลอง ด้วยความคลาดเคลื่อน ±15 %

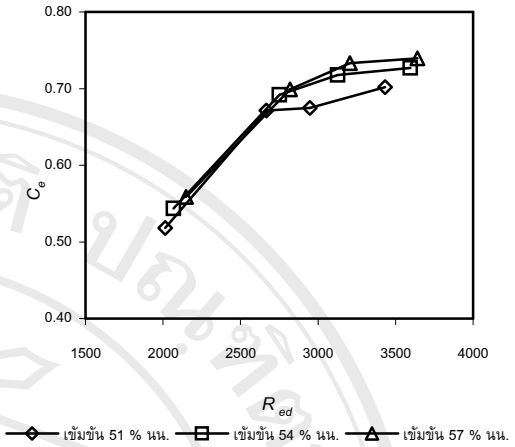
สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของเครื่องวัดการไหลแบบข้องอ แสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์เพิ่มขึ้นตามค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ โดยกราฟมีความชันมากในช่วงค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำ ความชันค่อยๆลดลงที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงๆ และมีแนวโน้มว่าจะคงที่ ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลของ Miller (1996) แต่การเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์ ไม่สัมพันธ์กับจุดวัดความดัน และตำแหน่งติดตั้งข้องอ ดังแสดงในรูปที่ 10 และ 11 สำหรับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ โดยค่าสัมประสิทธิ์เพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น แต่แตกต่างกันไม่มากนัก ซึ่งมีค่ามากที่สุดไม่เกิน 3.57 % ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 10 แสดงผลของมุมจุดวัดความดัน ต่อค่าสัมประสิทธิ์ ของข้องอ



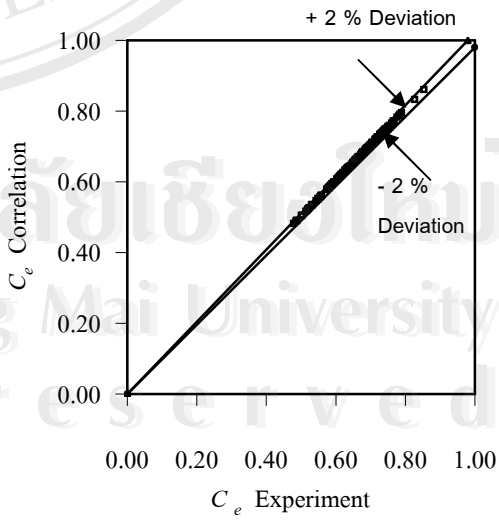
รูปที่ 11 แสดงผลของตำแหน่งติดตั้งข้องอ ต่อค่าสัมประสิทธิ์ของข้องอ



รูปที่ 12 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม ต่อค่าสัมประสิทธิ์ของข้องอ

จากผลการวิเคราะห์ค่าความดันแตกต่าง พบว่า ข้องอในตำแหน่งที่ 3 มีค่าความดันแตกต่างต่ำกว่า ตำแหน่งที่ 1 และ 2 มาก นอกจากนี้ยังมีการไหลแบบแยกชั้น ซึ่งไม่ตรงกับสมมติฐานของสมการเครื่องวัดการไหลแบบข้องอ เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของข้องอ ก็แตกต่างจากตำแหน่งติดตั้งที่ 1 และ 2 มาก จึงนำข้อมูลเฉพาะข้องอตำแหน่งที่ 1 และ 2 มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างสัมประสิทธิ์ของข้องอ กับตัวแปรอิสระอื่นๆ ได้สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ ดังนี้

$$C_e = 0.7569(f_p^{-0.4994})(R_{ed}^{0.0025})(S^{0.0036})(P_A^{0.0017})(M_P^{0.0007}) \quad (5)$$



รูปที่ 13 แสดงผลเปรียบเทียบ ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของข้องอ ที่คำนวณจากความสัมพันธ์ และจากผลการทดลอง

จากรูปที่ 13 พบว่าสมการข้างต้น สามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์ของข้องอตำแหน่งที่ 1 และ 2 ได้ครอบคลุมข้อมูลผลการทดลองทั้งหมด ด้วยความคลาดเคลื่อน ± 2 %

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ค่าความดันแตกต่างคร่อมจุดวัดบนข้องอ และค่าสัมประสิทธิ์ แปรผันตามค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ของน้ำยิปซัมในช่วง 2,000 ถึง 3,500 จุดวัดความดันที่มุม 45 องศา มีค่าความดันแตกต่างคร่อมจุดวัดสูงที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อสลับทิศทางการไหล ตำแหน่งติดตั้งที่มีการไหลเข้าแบบปั่นป่วน และแบบพัฒนาเต็มที่ ให้ค่าความดันแตกต่าง และค่าสัมประสิทธิ์ของเครื่องวัดการไหลแบบข้องอใกล้เคียงกัน เมื่อการไหลเป็นแบบเนื้อเดียว ตลอดหน้าตัด เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของน้ำยิปซัม ส่งผลกระทบเพียงเล็กน้อย ต่อค่าความดันแตกต่าง และค่าสัมประสิทธิ์ของเครื่องวัดการไหลแบบข้องอ สมการที่ได้มาจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ทำนายค่าความดันแตกต่าง ได้ครอบคลุมข้อมูล 95.1 % ของผลการทดลอง ด้วยความคลาดเคลื่อน ± 15 % และสามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์ ครอบคลุมข้อมูลผลการทดลองทั้งหมด ด้วยความคลาดเคลื่อน ± 2 %

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณ สนับสนุนจาก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยผ่านโครงการความร่วมมือ ระหว่างการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1]. A.J. Ward Smith. (1971). *Pressure Losses in Ducted Flows*. London: Butterworth & Co (Publisher) Ltd.

[2]. Hugh W. Coleman and W. Glenn Steele, Jr. (1999). *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers.* 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.

[3]. F. Sanchez Silva, M. Toledo V. and J. Hernandez Ruiz. (1997). "Experimental Study for the Use of Elbows as Flowmeters", *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting,* Paper No. FEDSM97-3010.

[4]. Indian Standard. IS 9115 : 1979. *Method for estimation of incompressible fluid flow in closed conduits by bend meters*. New Delhi. Indian Standards Institution.

[5]. International Standard. ISO 2186 : 1973. *Fluid flow in closed conduits – Connections for pressure signal transmissions between primary and secondary elements*. Switzerland.

[6]. International Standard. ISO 8316 : 1987. *Measurement of liquid flow in closed conduits – Method by collection of the liquid in a volumetric tank*. Switzerland.

[7]. J.M. Colwell and C.A. Shook. (1989). "Use of an Elbow Flowmeter with Slurries", *Journal of Pipelines*, 7: 243-250.

[8]. J.W. Murdock, C.J. Foltz and C. Gregory. (1963). "Performance Characteristics of Elbow Flowmeters", *Journal of Basic Engineering ASME*, Paper No.63-WA-17.

[9]. KRC Application Pursuant to German and International Standards. (1997). Electricity Generating Authority of Thailand. Mae Moh Power Project Flue Gas Desulfurization Retrofit Unit 8-11.

[10]. Masayuki Toda, Norio Komori, Shozaburo Saito and Siro Maeda. (1972). "Hydraulic Conveying of Solids Through Pipe Bends", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 5: 4-13.

[11]. Richard W. Miller. (1996). *Flow Measurement Engineering Handbook*. 3rd Ed. New York: McGraw-Hill Book Company.

[12]. Upp E.L. and Paul J. LaNasa. (2003). *Fluid Flow Measurement : a practical guide to accuracy flow measurement.* 2nd Ed. Boston: Gulf Professional Publishing.

8. รายการสัญลักษณ์

ρ	ค่าความหนาแน่นของน้ำยิปซัม
θ	มุมของจุดวัดความดัน ที่แกนทำมุมกับแกนหน้าตัดไหลเข้าข้องอ
A	พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย ของท่อและข้องอ
f_P	ค่าปัจจัยความดันแตกต่าง
C_e	ค่าสัมประสิทธิ์ เครื่องวัดการไหลแบบข้องอ
D	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ และข้องอ
G_c	ความเร็วของมวล บนพื้นที่การไหลเฉลี่ย
M_P	ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดการไหล แบบข้องอ
P_A	มุมของจุดวัดความดัน ที่แกนทำมุมกับแกนหน้าตัดไหลเข้าข้องอ เทียบกับมุมของข้องอ
ΔP	ค่าความดันแตกต่าง คร่อมจุดวัดความดัน
Q_V	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
R_{ed}	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์
S	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นน้ำยิปซัม โดยน้ำหนัก
V	ความเร็วเฉลี่ย ของการไหล

ภาคผนวก ฏ

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ของอุปกรณ์จากผลการวิจัย

อุปกรณ์ของระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม ในระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 8-11 ใช้งานอยู่ปัจจุบัน เกิดการชำรุดจากการใช้งานนอกช่วงที่ออกแบบ โดยมีอายุการใช้งานต่ำกว่า บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์กำหนดไว้ (EXPECTED OPERATING LIFE TIME) ซึ่งทางบริษัทที่ผลิตอุปกรณ์ จะมีข้อมูลที่ใช้ในการกำหนดอายุการใช้งาน ได้แก่ ข้อมูลการออกแบบอุปกรณ์, ข้อมูลผลการใช้งานอุปกรณ์จากผู้ซื้อ, ข้อมูลจากการวิจัยและพัฒนา เป็นต้น โดยการกำหนดเป็นชั่วโมงการใช้งาน ซึ่งมีความแม่นยำสูง และได้รับความเชื่อถือ จากผู้ใช้ในวงการอุตสาหกรรมทั่วโลก ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้ชั่วโมงการทำงานดังกล่าว เป็นเกณฑ์ในการประเมินผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

1. ผลการประเมินค่าใช้จ่าย ที่สูญเสียจากอุปกรณ์ชำรุด

จากประวัติการใช้งานอุปกรณ์ สายพานกรองน้ำออกจากยิปซัม ในช่วงปี 2542 – 2547 พบว่า การชำรุดของอุปกรณ์จำนวน 86 ครั้ง โดยเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้น กับชิ้นส่วนต่างๆ เมื่อคิดค่าใช้จ่าย ที่สูญเสียจากการเปลี่ยนอะไหล่ ก่อนเวลาที่ผู้ผลิตกำหนด แสดงข้อมูลในตารางที่ ฏ.1 จากตาราง พบว่า โรงไฟฟ้าแม่เมาะต้องสูญเสียค่าใช้จ่าย ในการบำรุงรักษาอุปกรณ์สายพานกรองน้ำออกจากยิปซัม ที่มีอายุการใช้งานต่ำกว่าที่ผู้ผลิตออกแบบไว้ คิดเป็นค่าใช้จ่ายรวม 40.834 ล้านบาท หรือคิดเป็นค่าใช้จ่ายเฉลี่ย 6.805 ล้านบาท ต่อปี

ตาราง ฎ.1 แสดงผลการประเมินค่าใช้จ่ายที่สูญเสีย จากอายุการใช้งานจริง เทียบกับอายุการใช้งานของผู้ผลิตอุปกรณ์

รายการอะไหล่	อายุการใช้งานประเมินจากผู้ผลิต (ชั่วโมง)	อายุการใช้งานเฉลี่ยในการใช้งานจริง (ชั่วโมง)	ค่าใช้จ่ายเมื่ออายุการใช้งานเท่าผู้ผลิต (บาท)	ค่าใช้จ่ายจริงจากการเปลี่ยนอะไหล่ (บาท)
Filter Cloth	4,000	2,200	7,894,000	14,353,000
Wear Belt	15,000	9,600	1,119,000	1,749,000
Slide Plate	15,000	8,400	519,000	927,000
Rubber Belt	80,000	35,000	17,097,000	39,080,000
Belt Support Roller	16,000	5,400	1,685,000	4,992,000
Bearing (all position)	60,000	17,200	3,233,000	11,280,000
		รวม (บาท)	31,547,000	72,381,000

2. การประเมินค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง และใช้งานระบบควบคุมอัตราการไหล

การนำระบบควบคุมค่าอัตราการไหล ที่ได้จากงานวิจัยนี้ ไปประยุกต์ใช้งานในระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม ผู้วิจัยคาดว่า จะสามารถยืดอายุการใช้งาน อุปกรณ์สายพานกรองน้ำออกจากยิปซัม ไปจนถึงอายุการใช้งานที่ผู้ผลิตกำหนด โดยมีค่าใช้จ่ายดังนี้

2.1 ค่าลงทุนติดตั้งระบบควบคุมค่าอัตราการไหล สำหรับ ระบบแยกน้ำออกจากยิปซัมของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 8-11 (รวม 4 โรง) เป็นวงเงินประมาณ 0.75 ล้านบาท โดยแสดงข้อมูลในตารางที่ ฎ.2

2.2 ค่าใช้จ่ายในระหว่างการใช้งานอุปกรณ์ ในระบบควบคุมอัตราการไหล สำหรับระบบแยกน้ำออกจากยิปซัม ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 8-11 (รวม 4 โรง) ได้แก่

2.2.1 ค่ากระแสไฟฟ้า จากภาระของอุปกรณ์ขนาด 15 kW ทำงานตลอด 24 ชั่วโมง โดยใช้ราคาค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 1.5 บาท ต่อหน่วย คิดเป็นค่าใช้จ่ายรวม 788,400 บาท ต่อปี

2.2.2 ค่าสอบเทียบ อุปกรณ์วัดค่าความดันแตกต่าง และเครื่องวัดการไหลแบบข้องอรวม 20,000 บาท ต่อปี

ตาราง ฏ.2 แสดงการประเมินค่าใช้จ่ายในการลงทุนติดตั้ง อุปกรณ์ระบบควบคุมอัตราการไหล

ลำดับที่	รายการ	จำนวน (อัน/ชุด)	ค่าใช้จ่ายรวม (บาท)
1	ข้องอมาตรฐาน ขนาด 125 มม. มีจุดวัดความดันที่มุม 45 องศา	4	20,000
2	เครื่องมือวัดค่าความดันแตกต่าง (Diff. Pressure Transmitter)	4	264,000
3	ชุดต่อเพื่อไล่อากาศ และชะล้างตะกอนหน้าไดอะแฟรม	8	13,600
4	วาล์วขนาด 50 มม. ชนิดควบคุมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า	16	256,000
5	อุปกรณ์ปรับความถี่มอเตอร์ ขนาด 15 kW	4	160,000
6	ค่าแรงติดตั้ง และสอบเทียบเครื่องมือวัด	4	40,000
		รวม (บาท)	753,600

3. การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์

ในการประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ คำนวณระยะเวลาคืนทุน โดยใช้สมการ (ฏ.1)

$$\text{ระยะเวลาในการคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนเบื้องต้น}}{\text{รายได้เฉลี่ยต่อปี} - \text{ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปี}} \quad \ldots\ldots\ (\text{ฏ}.1)$$

ในการคำนวณระยะเวลาคืนทุน โดยใช้สมการ (ฏ.1) ผู้วิจัยนำข้อมูล ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปีที่สูญเสียจากอุปกรณ์ชำรุด ซึ่งประเมินได้ในหัวข้อ **1** มาใช้แทนค่า "รายได้เฉลี่ยต่อปี" ในสมการ โดยพิจารณาว่า ในกรณีที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ไม่ต้องสูญเสียค่าใช้จ่าย ที่เกิดจากการชำรุดของอุปกรณ์ เมื่อนำระบบควบคุมค่าอัตราการไหลเข้าใช้งาน ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย และถือเสมือนว่าเป็นรายได้ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะด้วย

ดังนั้น จากการแทนค่า เงินลงทุนเบื้องต้น = 753,600 บาท

รายได้เฉลี่ยต่อปี = 6,805,667 บาท

และ ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปี 788,400 + 20,000 = 808,840 บาท

คำนวณระยะเวลาในการคืนทุนได้ เท่ากับ **0.125 ปี** หรือประมาณ **46 วัน**

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายเฉลิมเกียรติ สวรรค์วงศ์	
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2516	
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย จังหวัดเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2534 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2538	
ประสบการณ์	พ.ศ. 2539 – 2541	วิศวกร ประจำแผนกบำรุงรักษาอุปกรณ์เครื่องกลอุปกรณ์เครื่องกล ระบบผลิตน้ำ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ
	พ.ศ. 2541 – 2542	วิศวกร หน่วยงานตรวจรับอุปกรณ์ ระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หน่วยที่ 8-11
	พ.ศ. 2543 – 2548	วิศวกร ประจำแผนกบำรุงรักษาอุปกรณ์เครื่องกล ระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
	พ.ศ. 2548	ทำการแทน ผู้จัดการแผนกบำรุงรักษาอุปกรณ์เครื่องกล ระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
	ปัจจุบัน	วิศวกร ประจำแผนกบำรุงรักษาอุปกรณ์เครื่องกล ระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์