

บทที่ 7

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ตารางแสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่า

การทดลองเปรียบเทียบแรงในแนวแกน X

ตารางที่ 7.1 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกน X ด้านลบ

น้ำหนัก		ความต่างศักย์ไฟฟ้าเอาท์พุท (โวลต์)							
(ปอนด์)	(นิวตัน)	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
0	0	0.000	-0.011	-0.004	0.022	0.002	-0.005	0.009	0.011
1	4.5	0.019	-0.014	-0.003	0.024	-0.007	-0.008	0.018	0.005
2	8.9	0.016	-0.017	-0.003	0.023	0.000	0.006	0.023	0.008
3	13.4	0.020	-0.031	0.000	0.021	-0.006	0.010	0.029	-0.003
4	17.8	0.017	-0.033	0.004	0.015	0.000	0.026	0.033	0.006
5	22.3	0.021	-0.045	0.009	0.019	-0.016	0.025	0.042	0.012
6	26.7	0.015	-0.051	0.017	0.027	-0.019	0.034	0.048	0.009
6.5	29.0	0.019	-0.050	0.015	0.024	-0.010	0.034	0.050	0.019

* หมายเลข W1 - W8 คือความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากชุดของสเตรนเกจ ตามรูปที่ 5.1

ตารางที่ 7.2 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าแรงในแนวแกน X ด้านบวก

น้ำหนัก		ความต่างศักย์ไฟฟ้าเอาท์พุท (โวลต์)							
(ปอนด์)	(นิวตัน)	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
0	0	0.027	0.017	0.007	0.007	0.005	0.021	0.014	-0.017
1	4.5	0.041	-0.006	-0.001	0.004	-0.030	0.029	0.019	-0.034
2	8.9	0.033	-0.010	-0.009	0.000	-0.028	0.036	0.017	-0.044
3	13.4	0.038	-0.024	-0.012	0.001	-0.048	0.038	0.018	-0.046
4	17.8	0.034	-0.023	-0.027	0.000	-0.049	0.042	0.013	-0.044
5	22.3	0.036	-0.028	-0.027	0.000	-0.037	0.050	0.009	-0.043
6	26.7	0.027	-0.031	-0.040	-0.007	-0.054	0.052	0.011	-0.052
6.5	29.0	0.035	-0.038	-0.038	0.007	-0.041	0.062	0.010	-0.046

การทดลองปรับเทียบแรงในแนวแกน Y

ตารางที่ 7.3 แสดงผลการปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน Y ด้านลบ

น้ำหนัก		ความต่างศักย์ไฟฟ้าเอิร์ททุท (โวลท์)							
(ปอนด์)	(นิวตัน)	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
0	0	0.014	0.009	0.007	0.012	0.016	-0.009	0.000	0.007
1	4.5	0.036	-0.013	0.006	-0.002	-0.053	-0.015	0.008	-0.050
2	8.9	0.034	-0.021	0.003	0.001	-0.056	-0.012	0.008	-0.069
3	13.4	0.028	-0.025	-0.004	-0.006	-0.077	-0.011	0.011	-0.099
4	17.8	0.026	-0.029	-0.002	0.001	-0.061	-0.012	0.009	-0.082
5	22.3	0.016	-0.030	-0.003	0.013	-0.056	-0.016	0.010	-0.083
6	26.7	0.018	-0.033	-0.009	0.013	-0.067	-0.020	0.011	-0.101
6.5	29.0	0.015	-0.028	-0.009	0.018	-0.040	-0.013	0.004	-0.071

ตารางที่ 7.4 แสดงผลการปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน Y ด้านบวก

น้ำหนัก		ความต่างศักย์ไฟฟ้าเอิร์ททุท (โวลท์)							
(ปอนด์)	(นิวตัน)	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
0	0	-0.010	0.020	0.010	-0.013	0.011	-0.006	-0.008	0.004
1	4.5	-0.013	0.010	0.015	-0.021	-0.028	-0.009	-0.007	0.002
2	8.9	-0.004	0.007	0.015	-0.023	-0.040	-0.009	-0.003	0.003
3	13.4	0.008	0.015	0.017	-0.021	-0.043	-0.008	0.001	-0.013
4	17.8	0.007	0.009	0.015	-0.016	-0.056	-0.011	0.002	-0.001
5	22.3	-0.002	0.018	0.016	-0.017	-0.040	-0.009	0.001	0.008
6	26.7	0.009	0.013	0.015	-0.016	-0.043	-0.006	0.005	-0.004
6.5	29.0	0.011	0.002	0.001	-0.016	-0.041	-0.008	0.000	-0.012

การทดลองปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน Z

ตารางที่ 7.5 แสดงผลการปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน Z ด้านลบ

น้ำหนัก		ความต่างศักย์ไฟฟ้าเทอร์มัททุก(โวลท์)							
(ปอนด์)	(นิวตัน)	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
0	0	0.005	0.012	0.008	-0.025	-0.006	0.006	-0.008	-0.014
2.06	9.16	0.013	0.162	0.000	0.185	-0.019	0.218	0.014	0.185
4.06	18.08	0.022	0.334	-0.011	0.376	-0.017	0.423	0.028	0.366
5.06	22.53	0.013	0.383	-0.03	0.478	-0.037	0.514	0.046	0.434
6.06	26.99	0.038	0.484	-0.042	0.567	-0.009	0.646	0.036	0.544
7.06	31.45	0.036	0.591	-0.053	0.66	-0.008	0.737	0.047	0.621
8.06	35.91	0.048	0.653	-0.058	0.755	-0.004	0.847	0.058	0.739
9.06	40.36	0.042	0.708	-0.072	0.836	-0.006	0.951	0.065	0.832
10.06	44.82	0.054	0.796	-0.048	0.945	-0.007	1.062	0.074	0.943

ตารางที่ 7.6 แสดงผลการปรับเทียบค่าแรงในแนวแกน Z ด้านบวก

น้ำหนัก		ความต่างศักย์ไฟฟ้าเทอร์มัททุก(โวลท์)							
(ปอนด์)	(นิวตัน)	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
0	0	-0.020	-0.003	-0.036	0.001	-0.026	-0.010	0.004	-0.014
0.75	3.34	-0.003	-0.100	-0.034	0.022	-0.022	-0.024	-0.016	-0.194
2.75	12.26	-0.017	-0.279	-0.047	-0.158	0.000	-0.197	-0.045	-0.405
4.75	21.17	-0.015	-0.454	-0.015	-0.335	0.017	-0.380	-0.054	-0.561
6.75	30.09	-0.046	-0.646	-0.066	-0.514	-0.014	-0.542	-0.087	-0.800
7.75	34.55	-0.039	-0.746	-0.039	-0.582	-0.009	-0.629	-0.089	-0.877
8.75	39.01	-0.048	-0.851	-0.036	-0.668	0.002	-0.717	-0.095	-0.980
9.75	43.46	-0.056	-0.949	-0.017	-0.748	0.004	-0.805	-0.102	-1.080
10.75	47.92	-0.045	-1.030	-0.024	-0.825	0.018	-0.888	-0.126	-1.185
11.75	52.38	-0.062	-1.123	-0.028	-0.919	0.008	-0.953	-0.157	-1.307
12.75	56.84	-0.064	-1.238	0.021	-0.985	0.027	-1.032	-0.153	-1.405

การทดลองเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน X

ตารางที่ 7.7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน X ด้านลบ

น้ำหนัก		ความต่างศักย์ไฟฟ้าอาทิตย์(โวลท์)							
(ปอนด์)	(นิวตัน)	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
0	0	0.015	0.007	-0.006	0.011	-0.017	-0.005	0.000	0.019
0.56	0.37	0.016	-0.020	-0.076	0.754	-0.162	-0.030	-0.069	-0.971
1.06	0.71	-0.011	-0.026	-0.115	1.400	-0.161	-0.037	-0.134	-1.624
1.56	1.04	-0.024	-0.039	-0.173	2.032	-0.173	-0.041	-0.208	-2.278
2.06	1.37	-0.034	-0.044	-0.212	2.669	-0.193	-0.046	-0.266	-2.992
2.56	1.71	-0.052	-0.062	-0.252	3.348	-0.186	-0.046	-0.338	-3.661
3.06	2.04	-0.056	-0.065	-0.281	3.973	-0.184	-0.047	-0.401	-4.270
3.56	2.38	-0.042	-0.067	-0.289	4.621	-0.141	-0.034	-0.470	-4.867

ตารางที่ 7.8 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน X ด้านบวก

น้ำหนัก		ความต่างศักย์ไฟฟ้าอาทิตย์(โวลท์)							
(ปอนด์)	(นิวตัน)	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
0	0	0.008	0.002	0.004	0.021	0.008	-0.002	-0.004	0.054
0.56	0.37	-0.079	-0.038	-0.050	-0.728	-0.159	-0.033	0.086	0.715
1.06	0.71	-0.064	-0.031	-0.028	-1.347	-0.146	-0.019	0.148	1.346
1.56	1.04	-0.053	-0.032	0.014	-2.020	-0.182	-0.026	0.223	1.957
2.06	1.37	-0.046	-0.029	0.033	-2.691	-0.218	-0.029	0.288	2.536
2.56	1.71	-0.027	-0.038	0.088	-3.347	-0.236	-0.015	0.352	3.181
3.06	2.04	-0.011	-0.036	0.119	-3.971	-0.236	-0.014	0.416	3.796
3.56	2.38	0.014	-0.025	0.174	-4.606	-0.203	0.000	0.482	4.445

การทดลองปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน Y

ตารางที่ 7.9 แสดงผลการปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน Y ด้านลบ

น้ำหนัก		ความต่างศักย์ไฟฟ้าเอิร์ททุท (โวลต์)							
(ปอนด์)	(นิวตัน)	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
0	0	0.012	0.000	0.048	0.019	0.003	-0.014	0.016	-0.003
0.56	0.37	-0.01	-0.725	0.031	0.019	-0.021	0.671	-0.006	-0.004
1.06	0.71	-0.04	-1.348	0.017	0.019	-0.008	1.282	-0.03	-0.023
1.56	1.04	-0.071	-1.964	0.006	0.025	-0.006	1.885	-0.052	-0.018
2.06	1.37	-0.102	-2.597	-0.003	0.028	-0.018	2.471	-0.059	-0.019
2.56	1.71	-0.136	-3.245	-0.022	0.022	-0.029	3.096	-0.072	-0.033
3.06	2.04	-0.162	-3.894	-0.027	0.038	-0.007	3.682	-0.086	-0.041
3.56	2.38	-0.198	-4.572	-0.033	0.043	-0.019	4.334	-0.105	-0.03

ตารางที่ 7.10 แสดงผลการปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน Y ด้านบวก

น้ำหนัก		ความต่างศักย์ไฟฟ้าเอิร์ททุท (โวลต์)							
(ปอนด์)	(น.ม)	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
0	0	0.015	0.001	0.008	0.011	0.015	-0.004	0.006	-0.008
0.56	0.37	0.039	0.71	0.034	0.021	0.008	-0.701	0.024	-0.019
1.06	0.71	0.064	1.356	0.04	0.025	0.007	-1.302	0.037	-0.018
1.56	1.04	0.092	1.964	0.044	0.027	0.012	-1.885	0.053	-0.025
2.06	1.37	0.121	2.588	0.049	0.027	0.015	-2.492	0.065	-0.033
2.56	1.71	0.152	3.222	0.048	0.035	0.033	-3.084	0.072	-0.039
3.06	2.04	0.182	3.863	0.061	0.034	0.031	-3.676	0.097	-0.029
3.56	2.38	0.212	4.462	0.059	0.032	0.036	-4.25	0.104	-0.053

การทดลองปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน Z

ตารางที่ 7.11 แสดงผลการปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน Z ด้านลบ

น้ำหนัก (ปอนด์)	โมเมนต์ (น.ม)	ความต่างศักย์ไฟฟ้าเทอร์มอปูท(โวลท์)							
		W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
0	0	0.000	0.023	-0.076	0.007	0.038	0.024	-0.006	-0.005
1.06	0.52	-0.547	0.007	-0.674	0.021	-0.509	0.030	0.499	0.035
2.06	1.01	-1.064	0.017	-1.176	0.011	-1.017	0.054	1.009	0.047
3.06	1.50	-1.575	0.011	-1.715	0.017	-1.570	0.063	1.508	-0.066
4.06	1.99	-2.080	0.011	-2.266	0.018	-2.065	0.086	1.994	-0.004
5.06	2.48	-2.584	0.003	-2.779	0.013	-2.553	0.117	2.479	0.056
6.06	2.97	-3.103	-0.006	-3.298	0.011	-3.033	0.150	2.950	0.098
7.055	3.459	-3.633	-0.006	-3.864	0.025	-3.56	0.135	3.461	0.127

ตารางที่ 7.12 แสดงผลการปรับเทียบค่าโมเมนต์ในแนวแกน Z ด้านบวก

น้ำหนัก (ปอนด์)	โมเมนต์ (น.ม)	ความต่างศักย์ไฟฟ้าเทอร์มอปูท(โวลท์)							
		W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
0	0	0.011	0.013	0.002	0.005	0.039	0.011	-0.012	0.019
1.06	0.52	0.548	-0.025	0.479	0.004	0.527	-0.031	-0.537	-0.062
2.06	1.01	1.075	-0.032	1.002	-0.003	1.016	-0.042	-1.046	-0.065
3.06	1.50	1.587	-0.033	1.524	-0.004	1.527	-0.041	-1.552	-0.09
4.06	1.99	2.082	-0.033	2.027	-0.007	1.992	-0.048	-2.013	-0.133
5.06	2.48	2.607	-0.032	2.588	-0.015	2.507	-0.06	-2.507	-0.17
6.06	2.97	3.115	-0.035	3.112	-0.019	2.999	-0.067	-2.994	-0.182
7.06	3.46	3.627	-0.001	3.79	-0.043	3.505	-0.038	-3.492	-0.234

การวิเคราะห์หาค่าความชันของความสัมพันธ์โดยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด

ตารางที่ 7.13 แสดงผลการปรับเทียบหาความสัมพันธ์ของแรงในแนวแกน X

มวล	แรง	ความต่างศักย์ไฟฟ้า							
		W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
(ปอนด์)	(นิวตัน)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)
-6.56	-29.22	0.019	-0.039	0.019	0.002	-0.012	0.039	0.041	0.008
-6.06	-26.99	0.015	-0.04	0.021	-0.005	-0.021	0.039	0.039	-0.002
-5.06	-22.53	0.021	-0.034	0.013	-0.003	-0.018	0.03	0.033	0.001
-4.06	-18.08	0.017	-0.022	0.008	-0.007	-0.002	0.031	0.024	-0.005
-3.06	-13.62	0.02	-0.02	0.004	-0.001	-0.008	0.015	0.02	-0.014
-2.06	-9.16	0.016	-0.006	0.001	0.001	-0.002	0.011	0.014	-0.003
-1.06	-4.70	0.019	-0.003	0.001	0.002	-0.009	-0.003	0.009	-0.006
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.06	4.70	0.014	-0.023	-0.008	-0.003	-0.035	0.008	0.005	-0.017
2.06	9.16	0.006	-0.027	-0.016	-0.007	-0.033	0.015	0.003	-0.027
3.06	13.62	0.011	-0.041	-0.019	-0.006	-0.053	0.017	0.004	-0.029
4.06	18.08	0.007	-0.04	-0.034	-0.007	-0.054	0.021	-0.001	-0.027
5.06	22.53	0.009	-0.045	-0.034	-0.007	-0.042	0.029	-0.005	-0.026
6.06	26.99	0	-0.048	-0.047	-0.014	-0.059	0.031	-0.003	-0.035
6.56	29.22	0.008	-0.055	-0.045	0	-0.046	0.041	-0.004	-0.029
เฉลี่ย	0.00	0.012	-0.030	-0.009	-0.003	-0.026	0.022	0.012	-0.014
ความชัน		0.000	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.000	-0.001	-0.001
จุดตัด		0.012	-0.030	-0.009	-0.003	-0.026	0.022	0.012	-0.014

หมายเหตุ ตารางที่ 7.13 ถึง 7.18 จะเป็นการวิเคราะห์หาค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างแรงหรือโมเมนต์ (ในคอลัมน์ที่ 2) กับสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า W_1 ถึง W_8 จากสเตรนเกจชุดที่ 1 ถึง ชุดที่ 8 โดยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด และกราฟความสัมพันธ์จะแสดงในรูปที่ 7.1 ถึง รูปที่ 7.20

ตารางที่ 7.14 แสดงผลการปรับเทียบหาความสัมพันธ์ของแรงในแนวแกน Y

มวล	แรง	ความต่างศักย์ไฟฟ้า							
		W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
(ปอนด์)	(นิวตัน)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)
-6.56	-29.22	0.001	-0.037	-0.016	0.006	-0.056	-0.004	0.004	-0.078
-6.06	-26.99	0.004	-0.042	-0.016	0.001	-0.083	-0.011	0.011	-0.108
-5.06	-22.53	0.002	-0.039	-0.01	0.001	-0.072	-0.007	0.01	-0.09
-4.06	-18.08	0.012	-0.038	-0.009	-0.011	-0.077	-0.003	0.009	-0.089
-3.06	-13.62	0.014	-0.034	-0.011	-0.018	-0.093	-0.002	0.011	-0.106
-2.06	-9.16	0.02	-0.03	-0.004	-0.011	-0.072	-0.003	0.008	-0.076
-1.06	-4.70	0.022	-0.022	-0.001	-0.014	-0.069	-0.006	0.008	-0.057
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.06	4.70	-0.003	-0.01	0.005	-0.008	-0.039	-0.003	0.001	-0.002
2.06	9.16	0.006	-0.013	0.005	-0.01	-0.051	-0.003	0.005	-0.001
3.06	13.62	0.018	-0.005	0.007	-0.008	-0.054	-0.002	0.009	-0.017
4.06	18.08	0.017	-0.011	0.005	-0.003	-0.067	-0.005	0.01	-0.005
5.06	22.53	0.008	-0.002	0.006	-0.004	-0.051	-0.003	0.009	0.004
6.06	26.99	0.019	-0.007	0.005	-0.003	-0.054	0.000	0.013	-0.008
6.56	29.22	0.021	-0.018	-0.009	-0.003	-0.052	-0.002	0.008	-0.016
เฉลี่ย	0.000	0.011	-0.021	-0.003	-0.006	-0.059	-0.004	0.008	-0.043
ความชัน		0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
จุดตัด		0.011	-0.021	-0.003	-0.006	-0.059	-0.004	0.008	-0.043

ตารางที่ 7.15 แสดงผลการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของแรงในแนวแกน Z

มวล	แรง	ความต่างศักย์ไฟฟ้า								
		Fz	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
(ปอนด์)	(นิวตัน)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)	(โวลต์)
-10.06	-44.82	0.049	0.784	-0.056	0.97	-0.001	1.056	0.082	0.957	
-9.06	-40.36	0.037	0.696	-0.08	0.861	0	0.945	0.073	0.846	
-8.06	-35.91	0.043	0.641	-0.066	0.78	0.002	0.841	0.066	0.753	
-7.06	-31.45	0.031	0.579	-0.061	0.685	-0.002	0.731	0.055	0.635	
-6.06	-26.99	0.033	0.472	-0.05	0.592	-0.003	0.64	0.044	0.558	
-5.06	-22.53	0.008	0.371	-0.038	0.503	-0.031	0.508	0.054	0.448	
-4.06	-18.08	0.017	0.322	-0.019	0.401	-0.011	0.417	0.036	0.38	
-2.06	-9.16	0.008	0.15	-0.008	0.21	-0.013	0.212	0.022	0.199	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.75	3.34	0.017	-0.097	0.002	0.021	0.004	-0.014	-0.02	-0.18	
2.75	12.26	0.003	-0.276	-0.011	-0.159	0.026	-0.187	-0.049	-0.391	
4.75	21.17	0.005	-0.451	0.021	-0.336	0.043	-0.37	-0.058	-0.547	
6.75	30.09	-0.026	-0.643	-0.03	-0.515	0.012	-0.532	-0.091	-0.786	
7.75	34.55	-0.019	-0.743	-0.003	-0.583	0.017	-0.619	-0.093	-0.863	
8.75	39.01	-0.028	-0.848	0	-0.669	0.028	-0.707	-0.099	-0.966	
9.75	43.46	-0.036	-0.946	0.019	-0.749	0.03	-0.795	-0.106	-1.066	
10.75	47.92	-0.025	-1.027	0.012	-0.826	0.044	-0.878	-0.13	-1.171	
11.75	52.38	-0.042	-1.12	0.008	-0.92	0.034	-0.943	-0.161	-1.293	
12.75	56.84	-0.044	-1.235	0.057	-0.986	0.053	-1.022	-0.157	-1.391	
เฉลี่ย	5.880	0.002	-0.177	-0.016	-0.038	0.012	-0.038	-0.028	-0.204	
ความชัน		-0.001	-0.020	0.001	-0.019	0.001	-0.020	-0.002	-0.023	
จุดตัด		0.007	-0.061	-0.021	0.075	0.009	0.082	-0.014	-0.068	

ตารางที่ 7.16 แสดงผลการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ในแนวแกน X

มวล	โมเมนต์	ความต่างศักย์ไฟฟ้า							
		W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
(ปอนด์)	(น.ม)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)
-3.56	-2.38	-0.057	-0.074	-0.283	4.61	-0.124	-0.029	-0.47	-4.886
-3.06	-2.04	-0.071	-0.072	-0.275	3.962	-0.167	-0.042	-0.401	-4.289
-2.56	-1.71	-0.067	-0.069	-0.246	3.337	-0.169	-0.041	-0.338	-3.68
-2.06	-1.37	-0.049	-0.051	-0.206	2.658	-0.176	-0.041	-0.266	-3.011
-1.56	-1.04	-0.039	-0.046	-0.167	2.021	-0.156	-0.036	-0.208	-2.297
-1.06	-0.71	-0.026	-0.033	-0.109	1.389	-0.144	-0.032	-0.134	-1.643
-0.56	-0.37	0.001	-0.027	-0.07	0.743	-0.145	-0.025	-0.069	-0.99
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.56	0.37	-0.087	-0.04	-0.054	-0.749	-0.167	-0.031	0.09	0.661
1.06	0.71	-0.072	-0.033	-0.032	-1.368	-0.154	-0.017	0.152	1.292
1.56	1.04	-0.061	-0.034	0.01	-2.041	-0.19	-0.024	0.227	1.903
2.06	1.37	-0.054	-0.031	0.029	-2.712	-0.226	-0.027	0.292	2.482
2.56	1.71	-0.035	-0.04	0.084	-3.368	-0.244	-0.013	0.356	3.127
3.06	2.04	-0.019	-0.038	0.115	-3.992	-0.244	-0.012	0.42	3.742
3.56	2.38	0.006	-0.027	0.17	-4.627	-0.211	0.002	0.486	4.391
เฉลี่ย	0	-0.042	-0.041	-0.069	-0.009	-0.168	-0.025	0.009	-0.213
ความชัน		0.007	0.008	0.092	-1.950	-0.019	0.007	0.202	1.979
จุดตัด		-0.042	-0.041	-0.069	-0.009	-0.168	-0.025	0.009	-0.213

ตารางที่ 7.17 แสดงผลการปรับเทียบหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ในแนวแกน Y

มวล	โมเมนต์	ความต่างศักย์ไฟฟ้า							
		W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
(ปอนด์)	(น.ม)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)
-3.56	2.38	0.197	4.461	0.051	0.021	0.021	-4.246	0.098	-0.045
-3.06	2.04	0.167	3.862	0.053	0.023	0.016	-3.672	0.091	-0.021
-2.56	1.71	0.137	3.221	0.040	0.024	0.018	-3.080	0.066	-0.031
-2.06	1.37	0.106	2.587	0.041	0.016	0.000	-2.488	0.059	-0.025
-1.56	1.04	0.077	1.963	0.036	0.016	-0.003	-1.881	0.047	-0.017
-1.06	0.71	0.049	1.355	0.032	0.014	-0.008	-1.298	0.031	-0.010
-0.56	0.37	0.024	0.709	0.026	0.010	-0.007	-0.697	0.018	-0.011
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.56	-0.37	-0.022	-0.725	-0.017	0.000	-0.024	0.685	-0.022	-0.001
1.06	-0.71	-0.052	-1.348	-0.031	0.000	-0.011	1.296	-0.046	-0.020
1.56	-1.04	-0.083	-1.964	-0.042	0.006	-0.009	1.899	-0.068	-0.015
2.06	-1.37	-0.114	-2.597	-0.051	0.009	-0.021	2.485	-0.075	-0.016
2.56	-1.71	-0.148	-3.245	-0.070	0.003	-0.032	3.110	-0.088	-0.030
3.06	-2.04	-0.174	-3.894	-0.075	0.019	-0.010	3.696	-0.102	-0.038
3.56	-2.38	-0.210	-4.572	-0.081	0.024	-0.022	4.348	-0.121	-0.027
เฉลี่ย	0	-0.003	-0.012	-0.006	0.012	-0.006	0.010	-0.007	-0.020
ความชัน		0.083	1.897	0.032	0.002	0.009	-1.810	0.047	-0.001
จุดตัด		-0.003	-0.012	-0.006	0.012	-0.006	0.010	-0.007	-0.020

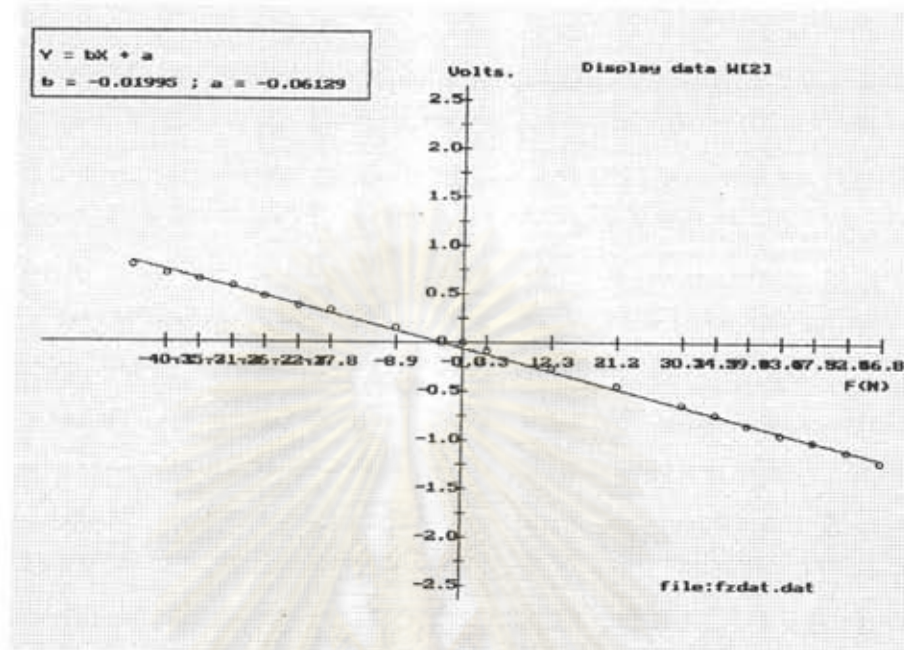
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.18 แสดงผลการปรับเทียบหาความสัมพันธ์ของ โมเมนต์ในแนวแกน Z

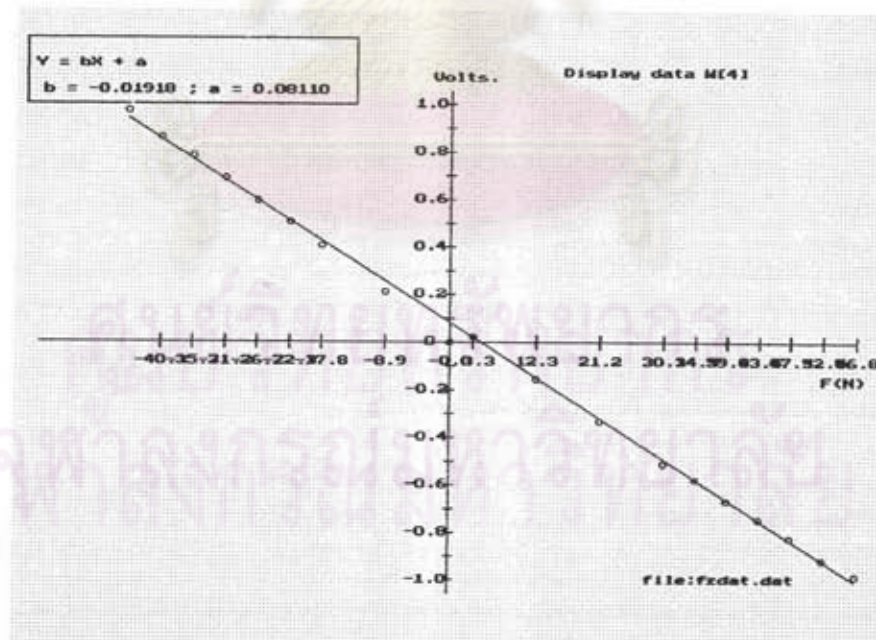
มวล	โมเมนต์	ความต่างศักย์ไฟฟ้า							
		W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
(ปอนด์)	(น.ม)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)	(โวลท์)
-7.06	-3.46	-3.63	-0.029	-3.788	0.018	-3.598	0.111	3.467	0.132
-6.06	-2.97	-3.10	-0.029	-3.222	0.004	-3.071	0.126	2.956	0.103
-5.06	-2.48	-2.58	-0.020	-2.703	0.006	-2.591	0.093	2.485	0.061
-4.06	-1.99	-2.08	-0.012	-2.190	0.011	-2.103	0.062	2.000	0.001
-3.06	-1.50	-1.58	-0.012	-1.639	0.010	-1.608	0.039	1.514	-0.061
-2.06	-1.01	-1.06	-0.006	-1.100	0.004	-1.055	0.030	1.015	0.052
-1.06	-0.52	-0.55	-0.016	-0.598	0.014	-0.547	0.006	0.505	0.040
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.06	0.52	0.54	-0.038	0.477	-0.001	0.488	-0.042	-0.525	-0.081
2.06	1.01	1.06	-0.045	1.000	-0.008	0.977	-0.053	-1.034	-0.084
3.06	1.50	1.58	-0.046	1.522	-0.009	1.488	-0.052	-1.540	-0.109
4.06	1.99	2.07	-0.046	2.025	-0.012	1.953	-0.059	-2.001	-0.152
5.06	2.48	2.60	-0.045	2.586	-0.020	2.468	-0.071	-2.495	-0.189
6.06	2.97	3.10	-0.048	3.110	-0.024	2.960	-0.078	-2.982	-0.201
7.06	3.46	3.62	-0.014	3.788	-0.048	3.466	-0.049	-3.480	-0.253
เฉลี่ย	0.00	0.00	-0.027	-0.049	-0.004	-0.052	0.004	-0.008	-0.049
ความชัน		1.047	-0.003	1.074	-0.007	1.020	-0.030	-1.005	-0.050
จุดตัด		-0.001	-0.027	-0.049	-0.004	-0.052	0.004	-0.008	-0.049



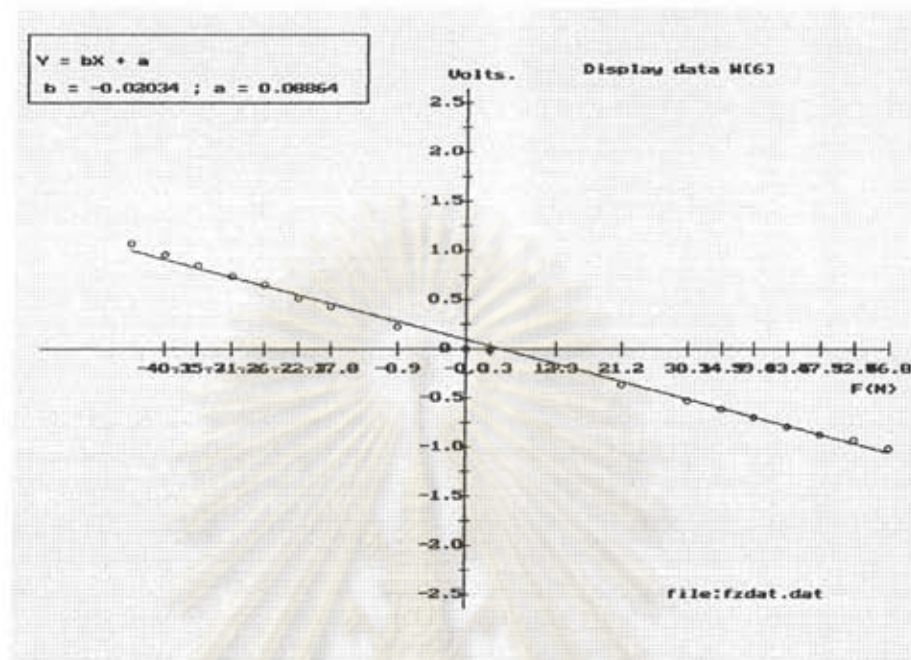
กราฟแสดงผลการทดลองเปรียบเทียบค่า



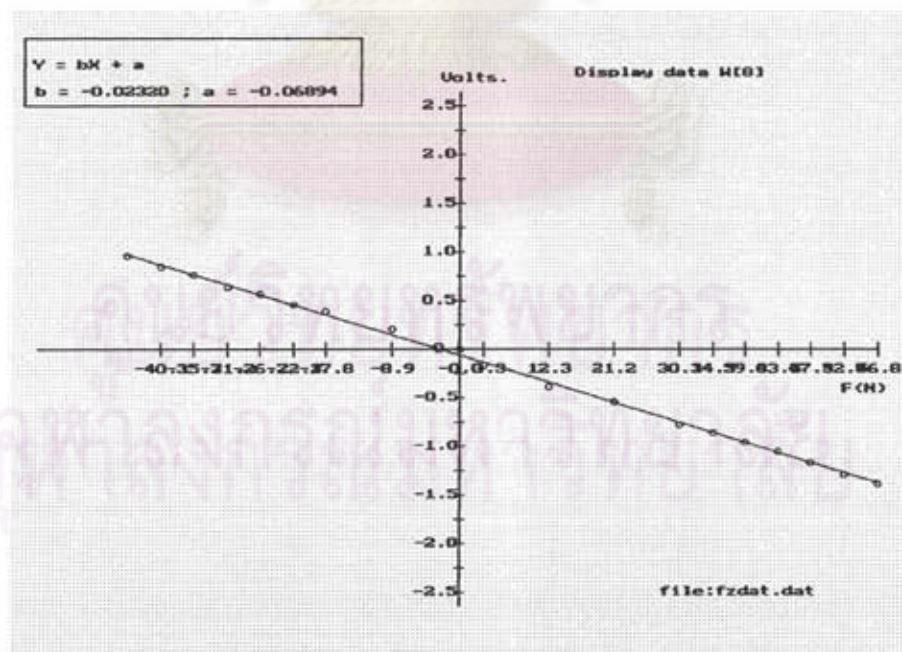
รูปที่ 7.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_2



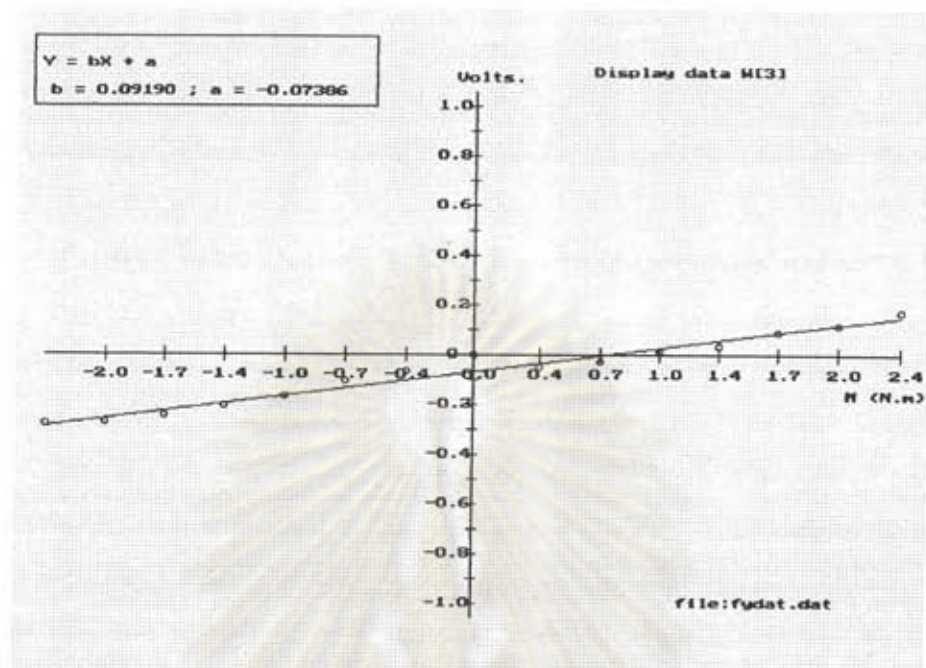
รูปที่ 7.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_4



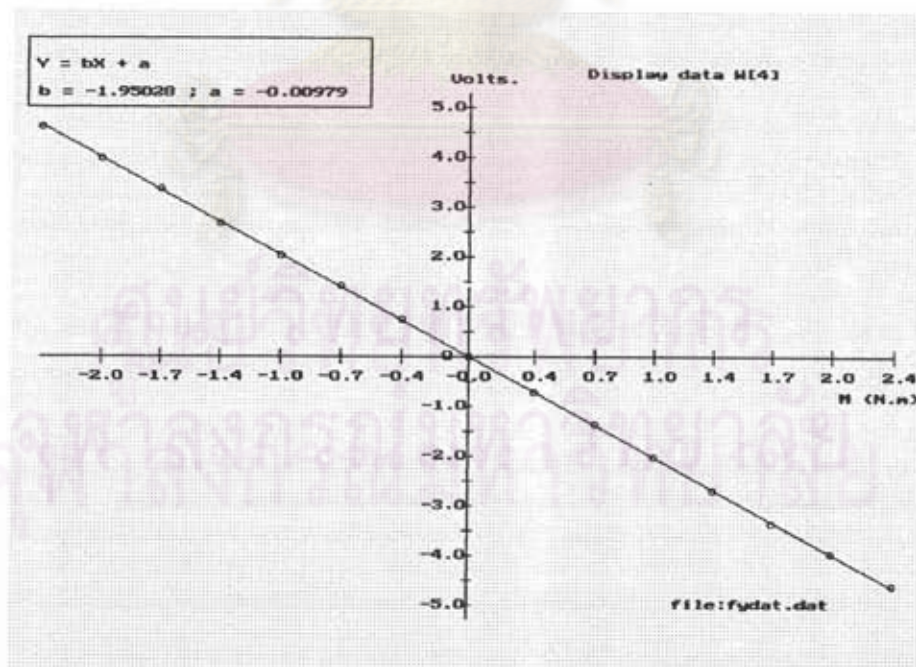
รูปที่ 7.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_6



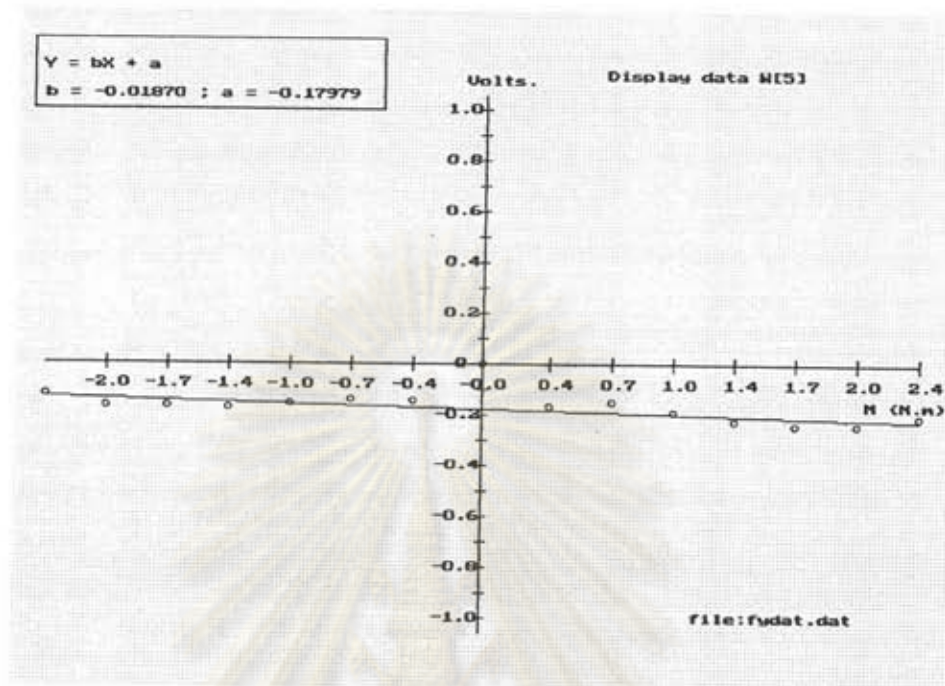
รูปที่ 7.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_8



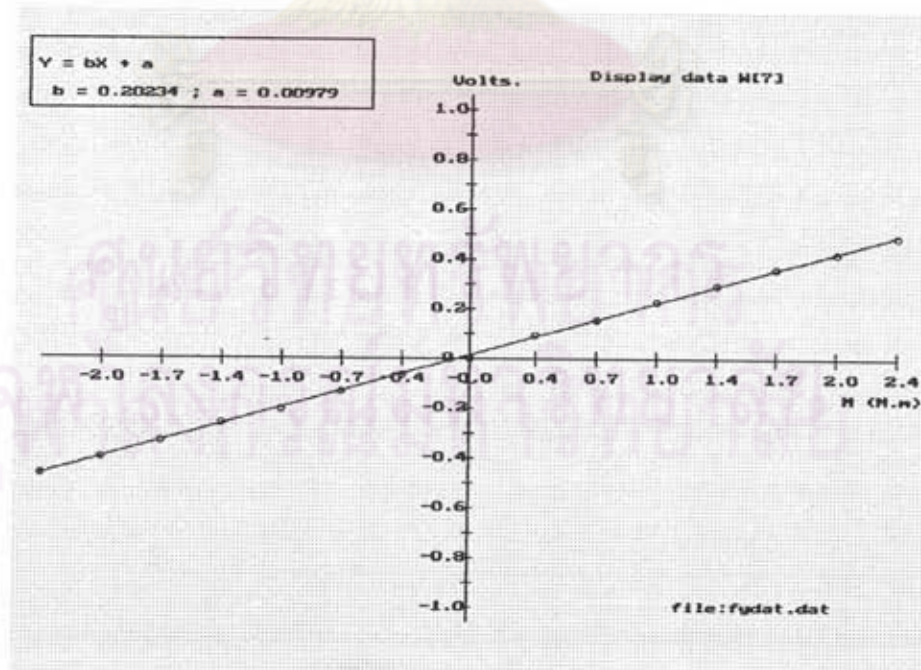
รูปที่ 7.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_x กับความต่างศักย์ไฟฟ้า w_3



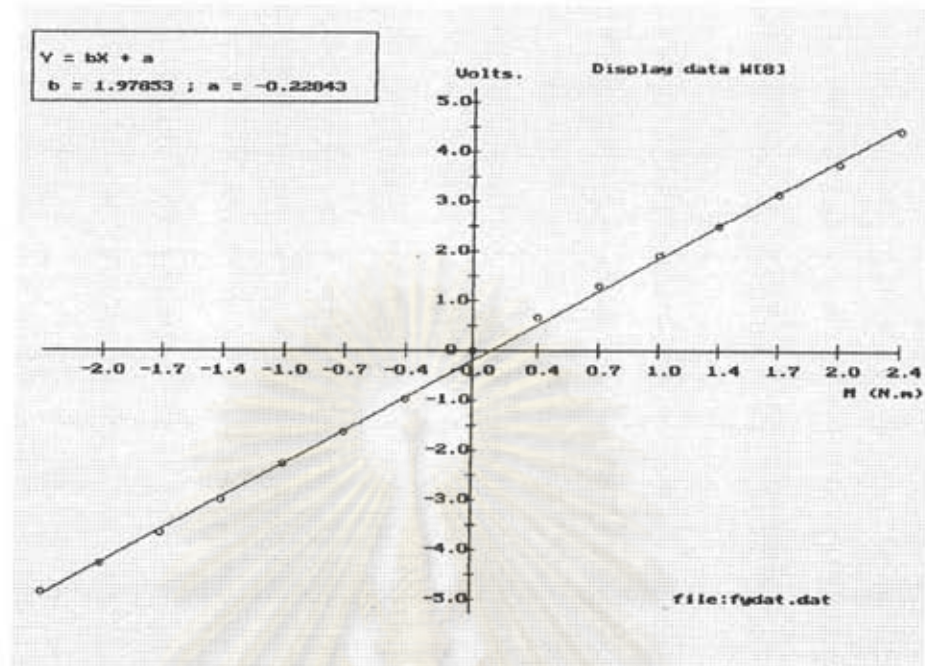
รูปที่ 7.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_x กับความต่างศักย์ไฟฟ้า w_4



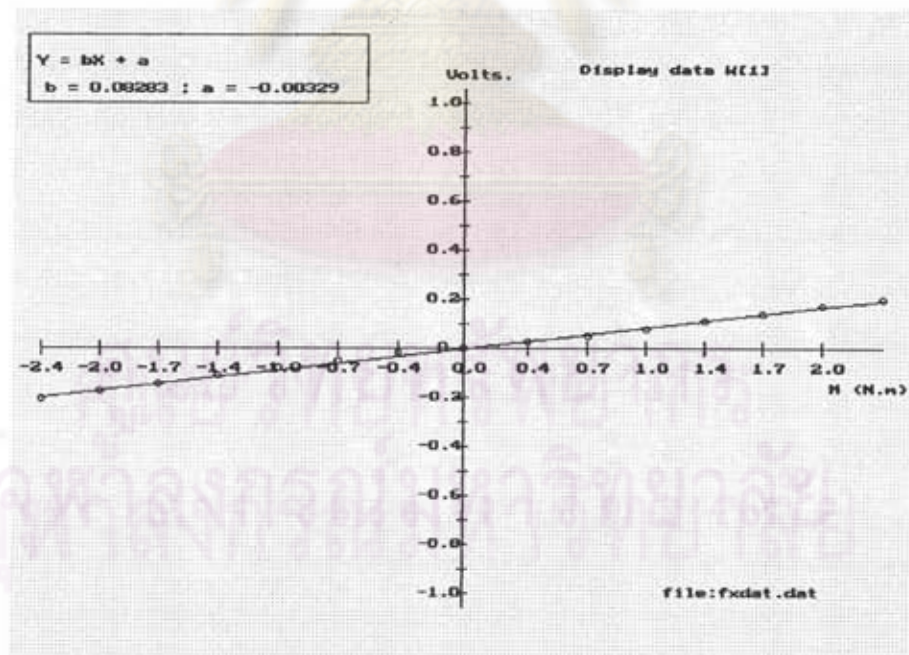
รูปที่ 7.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_x กับความต่างศักย์ไฟฟ้า w_5



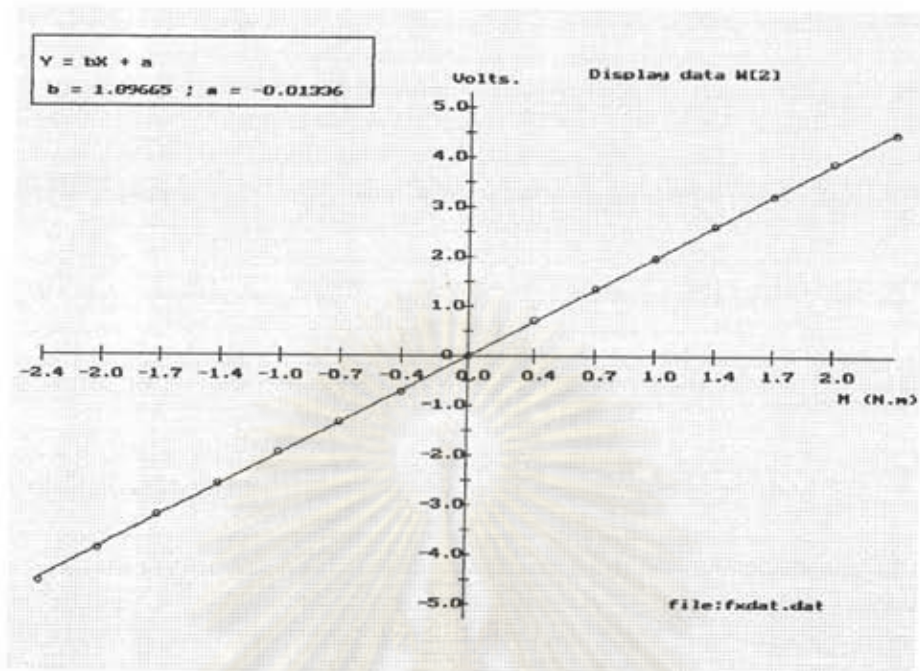
รูปที่ 7.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_x กับความต่างศักย์ไฟฟ้า w_7



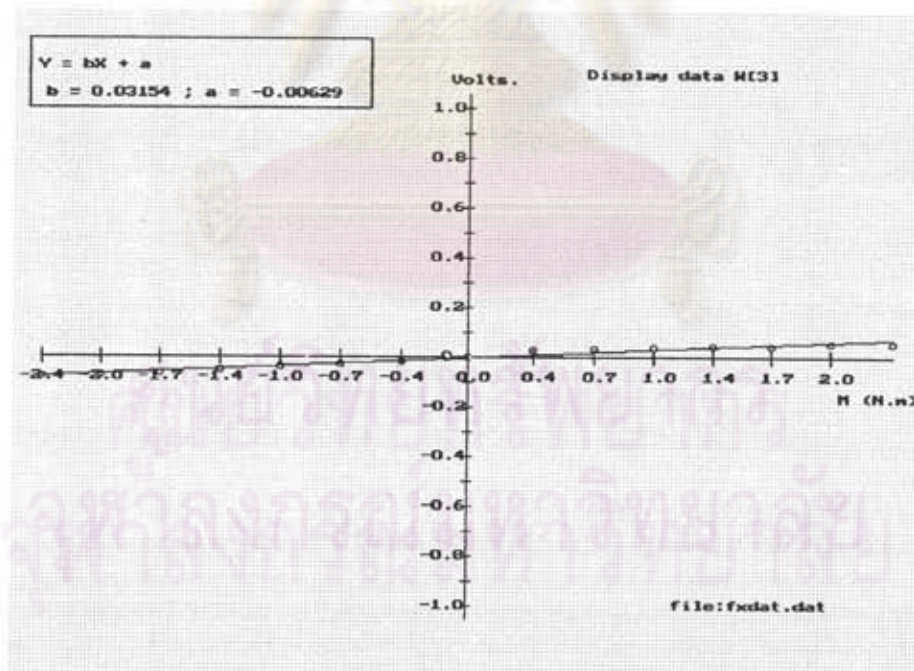
รูปที่ 7.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_x กับความต่างศักย์ไฟฟ้า V_8



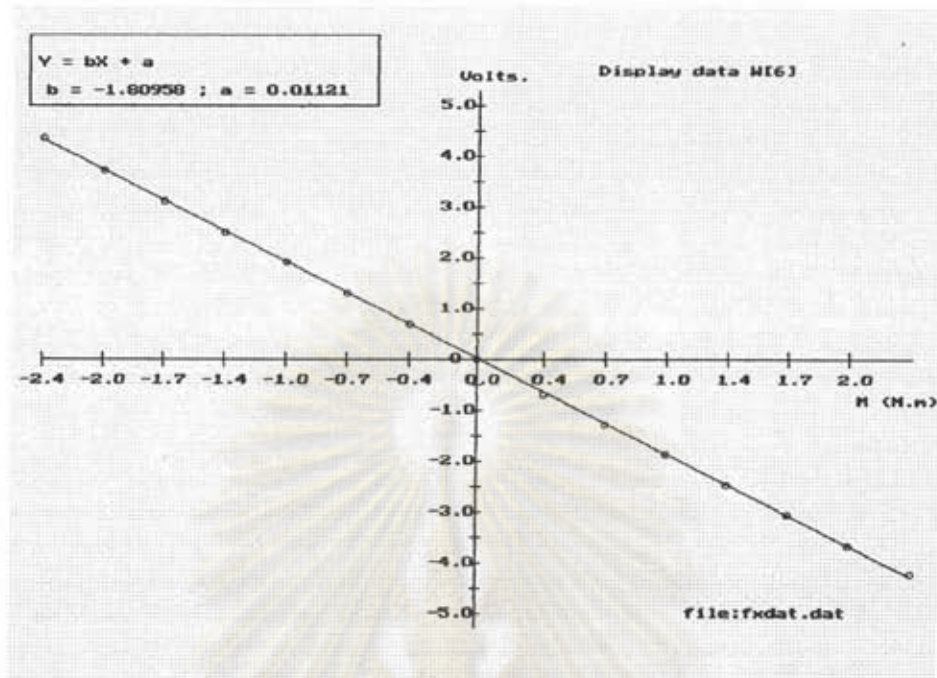
รูปที่ 7.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_y กับความต่างศักย์ไฟฟ้า V_1



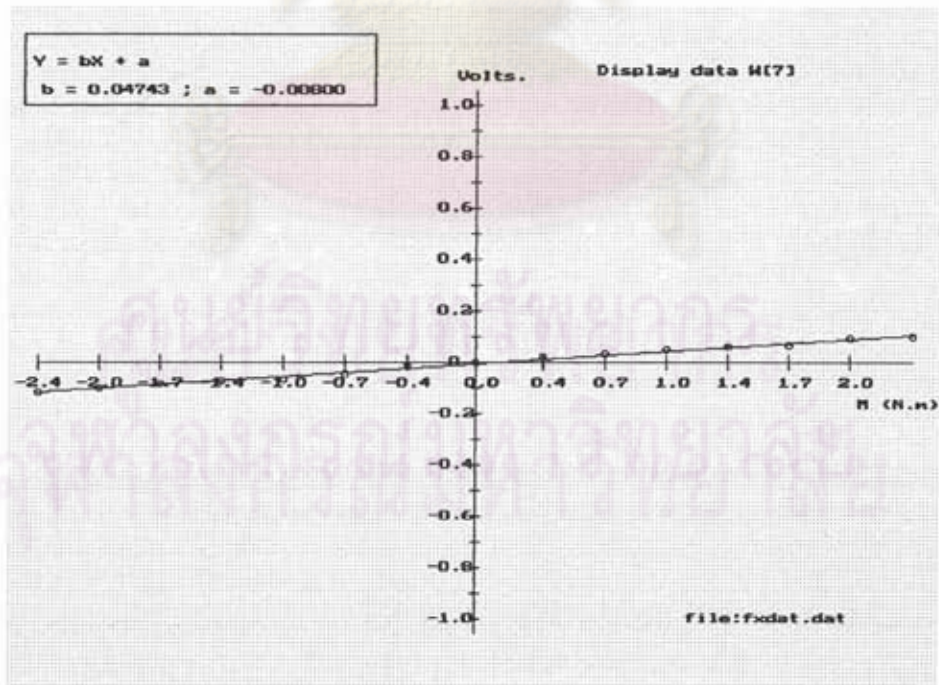
รูปที่ 7.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_y กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_2



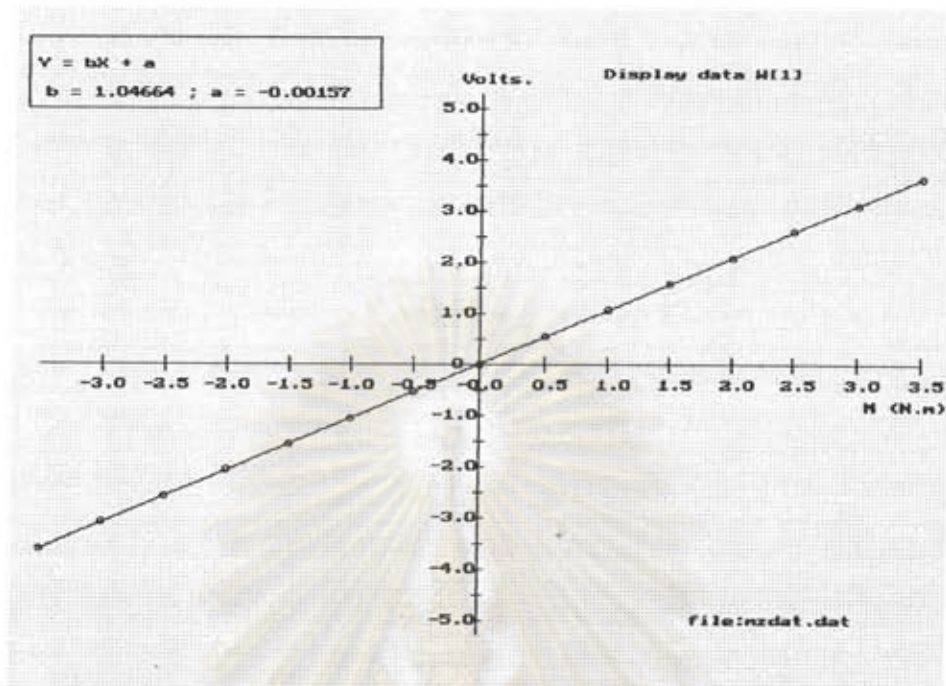
รูปที่ 7.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_y กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_3



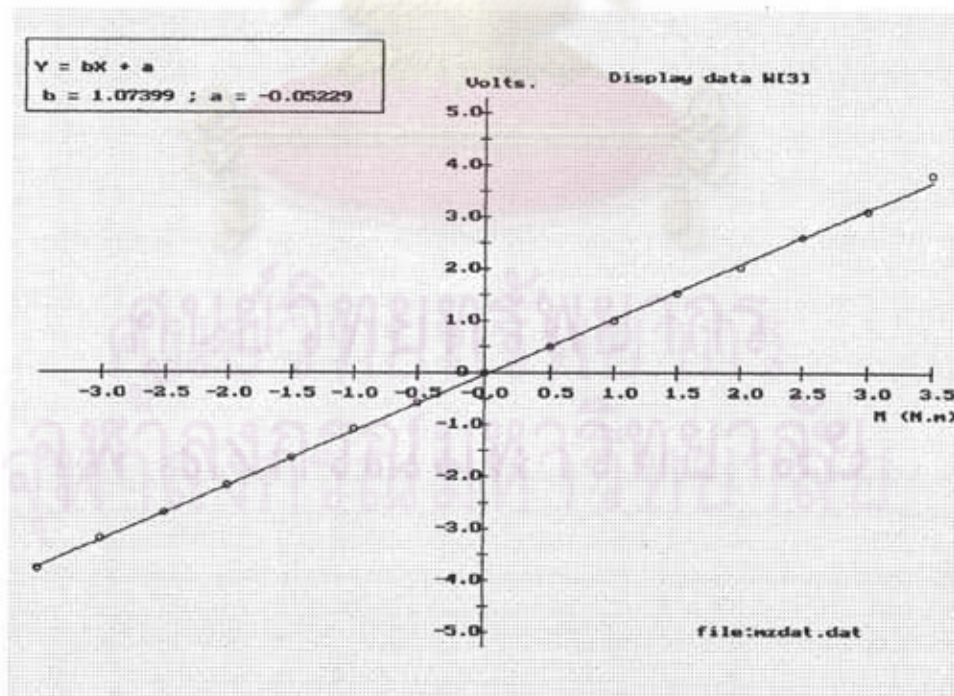
รูปที่ 7.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_y กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_6



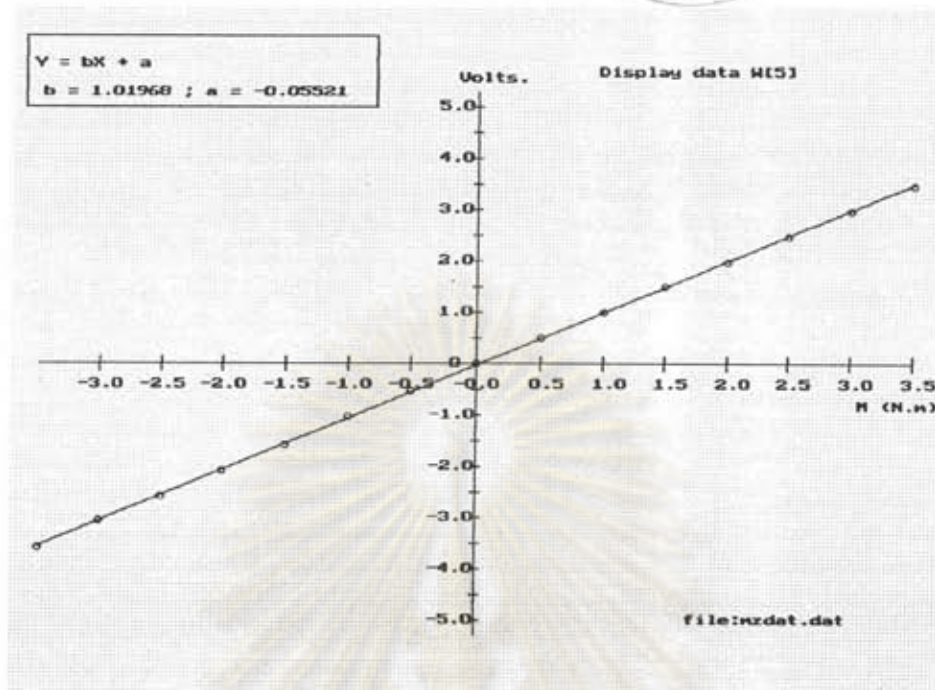
รูปที่ 7.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_y กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_7



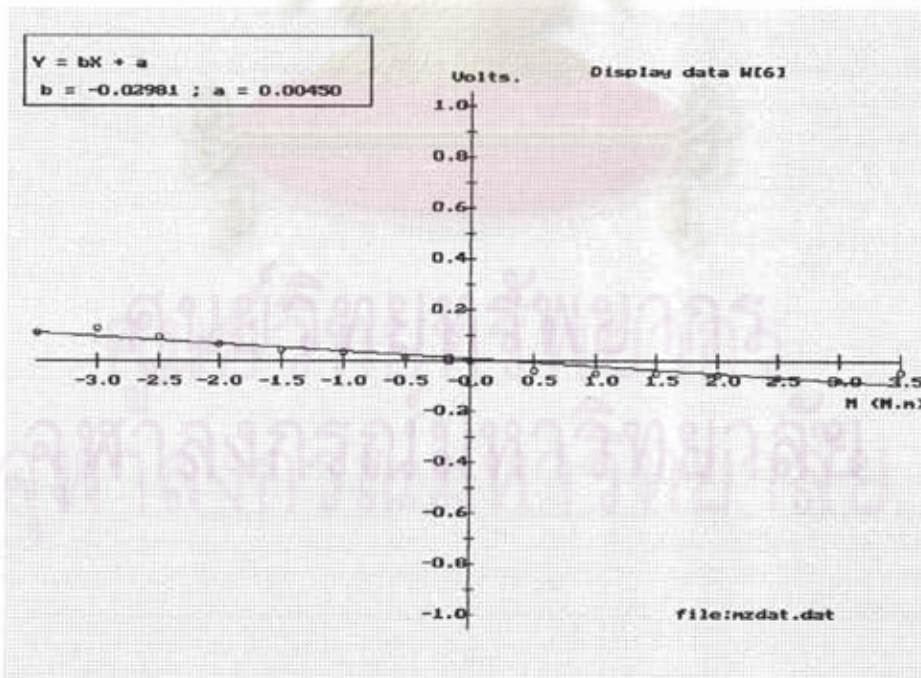
รูปที่ 7.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_2 กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_1



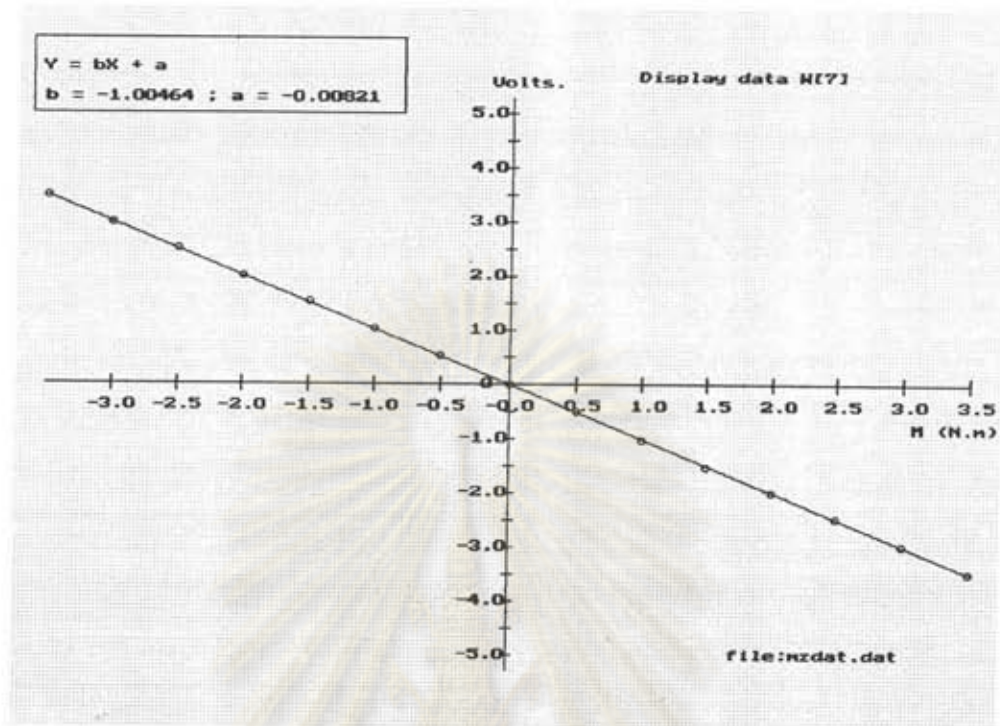
รูปที่ 7.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_2 กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_3



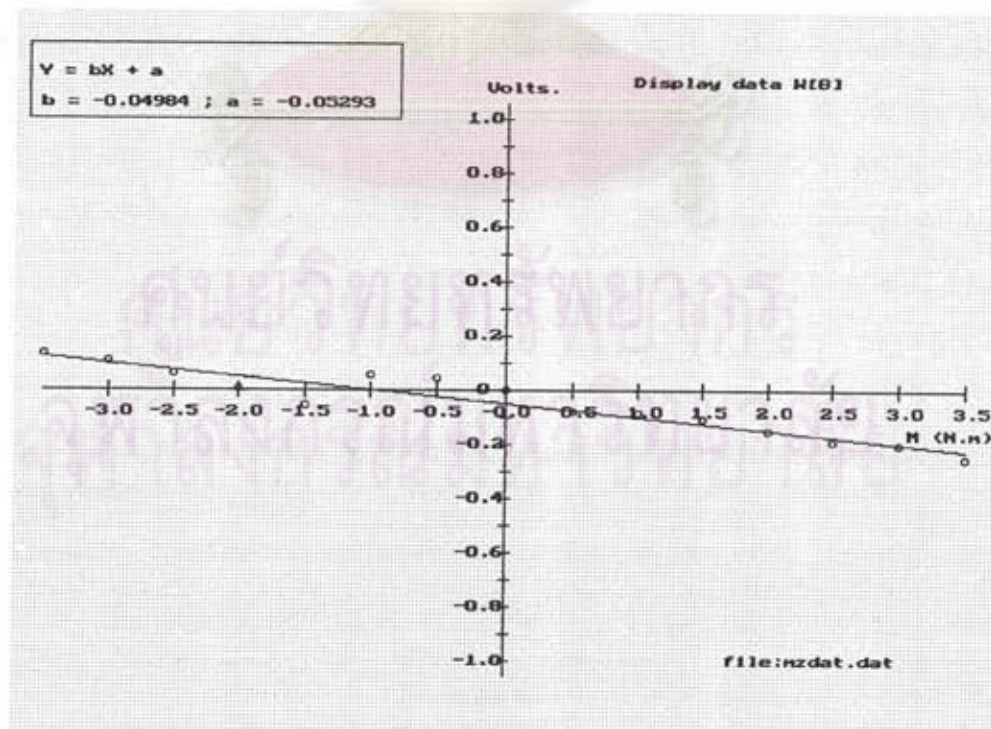
รูปที่ 7.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_5



รูปที่ 7.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_6



รูปที่ 7.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_7



รูปที่ 7.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ M_z กับความต่างศักย์ไฟฟ้า W_8

ตารางที่ 7.19 ตารางแสดงผลการทดสอบความแม่นยำ (Accuracy)

แรงกระทำในทิศทางแกน X					แรงกระทำในทิศทางแกน Y				
น.น.จริง	น.น.ที่อ่าน	ค่าผิดพลาด	Accuracy		น.น.จริง	น.น.ที่อ่าน	ค่าผิดพลาด	Accuracy	
(ปอนด์)	ได้(ปอนด์)		%reading	%FSO	(ปอนด์)	ได้(ปอนด์)		%reading	%FSO
0	-0.001	-0.001	-	-0.03	0	-0.003	-0.003	-	-0.08
0.555	0.556	0.001	0.18	0.03	0.555	0.522	-0.033	-5.95	-0.93
1.055	1.042	-0.013	-1.23	-0.37	1.055	1.003	-0.052	-4.93	-1.46
1.555	1.540	-0.015	-0.96	-0.42	1.555	1.488	-0.067	-4.31	-1.88
2.055	2.026	-0.029	-1.41	-0.82	2.055	1.966	-0.089	-4.33	-2.50
2.555	2.508	-0.047	-1.84	-1.32	2.555	2.458	-0.097	-3.80	-2.73
3.055	3.003	-0.052	-1.70	-1.46	3.055	2.922	-0.133	-4.35	-3.74
3.555	3.477	-0.078	-2.19	-2.19	3.555	3.407	-0.148	-4.16	-4.16
3.055	3.018	-0.037	-1.21	-1.04	3.055	2.958	-0.097	-3.18	-2.73
2.555	2.546	-0.009	-0.35	-0.25	2.555	2.48	-0.075	-2.94	-2.11
2.055	2.056	0.001	0.05	0.03	2.055	1.995	-0.060	-2.92	-1.69
1.555	1.549	-0.006	-0.39	-0.17	1.555	1.528	-0.027	-1.74	-0.76
1.055	1.059	0.004	0.38	0.11	1.055	0.98	-0.075	-7.11	-2.11
0.555	0.573	0.018	3.24	0.51	0.555	0.485	-0.070	-12.61	-1.97
0	0.013	0.013	-	0.37	0	-0.039	-0.039	-	-1.10
-0.555	-0.534	0.021	-3.78	0.59	-0.555	-0.594	-0.039	7.03	-1.10
-1.055	-1.008	0.047	-4.45	1.32	-1.055	-1.057	-0.002	0.19	-0.06
-1.555	-1.497	0.058	-3.73	1.63	-1.555	-1.525	0.030	-1.93	0.84
-2.055	-1.952	0.103	-5.01	2.90	-2.055	-1.998	0.057	-2.77	1.60
-2.555	-2.420	0.135	-5.28	3.80	-2.555	-2.458	0.097	-3.80	2.73
-3.055	-2.878	0.177	-5.79	4.98	-3.055	-2.94	0.115	-3.76	3.23
-3.555	-3.356	0.199	-5.60	5.60	-3.555	-3.416	0.139	-3.91	3.91
-3.055	-2.991	0.064	-2.09	1.80	-3.055	-2.965	0.090	-2.95	2.53
-2.555	-2.525	0.030	-1.17	0.84	-2.555	-2.484	0.071	-2.78	2.00
-2.055	-2.052	0.003	-0.15	0.08	-2.055	-1.996	0.059	-2.87	1.66
-1.555	-1.532	0.023	-1.48	0.65	-1.555	-1.514	0.041	-2.64	1.15
-1.055	-1.060	-0.005	0.47	-0.14	-1.055	-1.02	0.035	-3.32	0.98
-0.555	-0.569	-0.014	2.52	-0.39	-0.555	-0.566	-0.011	1.98	-0.31
0	0.001	0.001	-	0.03	0	-0.014	-0.014	-	-0.39

หมายเหตุ

การทดสอบความแม่นยำ แรง F_x และ F_y ออกแรงกระทำที่ระยะ L เท่ากับ 150 มิลลิเมตร จากเซนเซอร์เฟรม



ตารางที่ 7.19 (ต่อ)

แรงกระทำในทิศทางแกน Z									
น.น. จริง	น.น.ที่อ่าน	ค่าผิดพลาด	Accuracy		น.น. จริง	น.น.ที่อ่าน	ค่าผิดพลาด	Accuracy	
(เปอร์เซ็นต์)	ได้(เปอร์เซ็นต์)		%reading	%FSO	(เปอร์เซ็นต์)	ได้(เปอร์เซ็นต์)		%reading	%FSO
0.00	0.049	0.049	-	0.38	-9.055	-9.096	-0.041	0.45	-0.39
2.75	2.694	-0.056	-2.04	-0.44	-8.055	-8.113	-0.058	0.72	-0.55
4.75	4.611	-0.139	-2.93	-1.09	-7.055	-7.118	-0.063	0.89	-0.60
5.75	5.470	-0.280	-4.87	-2.20	-6.055	-6.108	-0.053	0.88	-0.50
6.75	6.621	-0.129	-1.91	-1.01	-5.055	-5.057	-0.002	0.04	-0.02
7.75	7.530	-0.220	-2.84	-1.73	-4.055	-4.067	-0.012	0.30	-0.11
8.75	8.398	-0.352	-4.02	-2.76	-3.055	-3.162	-0.107	3.50	-1.01
9.75	9.460	-0.290	-2.97	-2.27	-2.055	-2.265	-0.21	10.22	-1.99
10.75	10.454	-0.296	-2.75	-2.32	-1.055	-0.842	0.213	-20.19	2.02
11.75	11.354	-0.396	-3.37	-3.11	0	-0.104	-0.104	-	-0.99
12.75	12.398	-0.352	-2.76	-2.76					
11.75	11.420	-0.330	-2.81	-2.59					
10.75	10.488	-0.262	-2.44	-2.05					
9.75	9.513	-0.237	-2.43	-1.86					
8.75	8.542	-0.208	-2.38	-1.63					
7.75	7.628	-0.122	-1.57	-0.96					
6.75	6.567	-0.183	-2.71	-1.44					
5.75	5.679	-0.071	-1.23	-0.56					
4.75	4.726	-0.024	-0.51	-0.19					
2.75	2.848	0.098	3.56	0.77					
0.00	0.210	0.210	-	1.65					
-1.06	-1.135	-0.080	7.58	-0.76					
-2.06	-2.363	-0.308	14.99	-2.92					
-3.06	-3.424	-0.369	12.08	-3.50					
-4.06	-4.076	-0.021	0.52	-0.20					
-5.06	-5.255	-0.200	3.96	-1.90					
-6.06	-6.259	-0.204	3.37	-1.93					
-7.06	-7.182	-0.127	1.80	-1.20					
-8.06	-8.184	-0.129	1.60	-1.22					
-9.06	-9.131	-0.076	0.84	-0.72					
-10.06	-10.121	-0.066	0.66	-0.63					

ตารางที่ 7.19 (ต่อ)

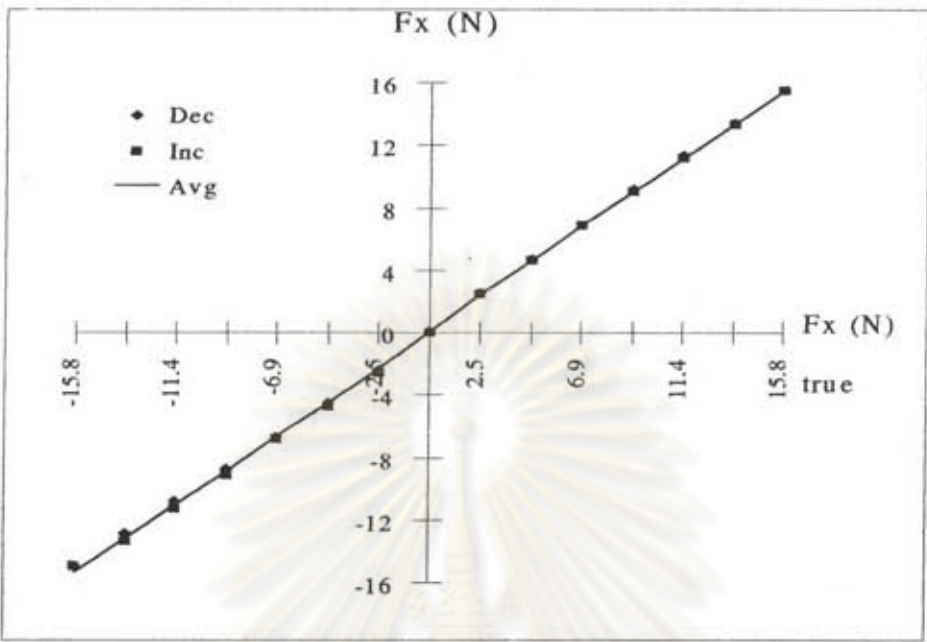
โมเมนต์กระทำในทิศทางแกน Z					
น.น. จริง (ปอนด์)	โมเมนต์ (น.ม)	โมเมนต์ ที่อ่านได้	ค่าผิดพลาด	Accuracy	
				%reading	%FSO
0	0	-0.006	-0.006	-	-0.17
1.055	0.517	0.528	0.011	2.06	0.31
2.055	1.008	0.985	-0.023	-2.25	-0.66
3.055	1.498	1.450	-0.048	-3.21	-1.39
4.055	1.988	1.908	-0.080	-4.04	-2.32
5.055	2.479	2.386	-0.093	-3.74	-2.68
6.055	2.969	2.844	-0.125	-4.21	-3.62
7.055	3.459	3.319	-0.140	-4.06	-4.06
6.055	2.969	2.894	-0.075	-2.53	-2.17
5.055	2.479	2.398	-0.081	-3.26	-2.33
4.055	1.988	1.947	-0.041	-2.08	-1.20
3.055	1.498	1.461	-0.037	-2.47	-1.07
2.055	1.008	0.995	-0.013	-1.26	-0.37
1.055	0.517	0.527	0.010	1.87	0.28
0	0	0.039	0.039	-	1.13
-1.055	-0.517	-0.472	0.045	-8.76	1.31
-2.055	-1.008	-0.938	0.070	-6.91	2.01
-3.055	-1.498	-1.424	0.074	-4.94	2.14
-4.055	-1.988	-1.879	0.109	-5.50	3.16
-5.055	-2.479	-2.354	0.125	-5.03	3.61
-6.055	-2.969	-2.804	0.165	-5.56	4.77
-7.055	-3.459	-3.284	0.175	-5.07	5.07
-6.055	-2.969	-2.832	0.137	-4.62	3.96
-5.055	-2.479	-2.364	0.115	-4.63	3.32
-4.055	-1.988	-1.893	0.095	-4.80	2.76
-3.055	-1.498	-1.437	0.061	-4.07	1.76
-2.055	-1.008	-0.962	0.046	-4.53	1.32
-1.055	-0.517	-0.497	0.020	-3.93	0.59
0	0	0.020	0.020	-	0.58

ตารางที่ 7.20 ตารางแสดงผลการทดสอบวิธีหอะบิลิตี

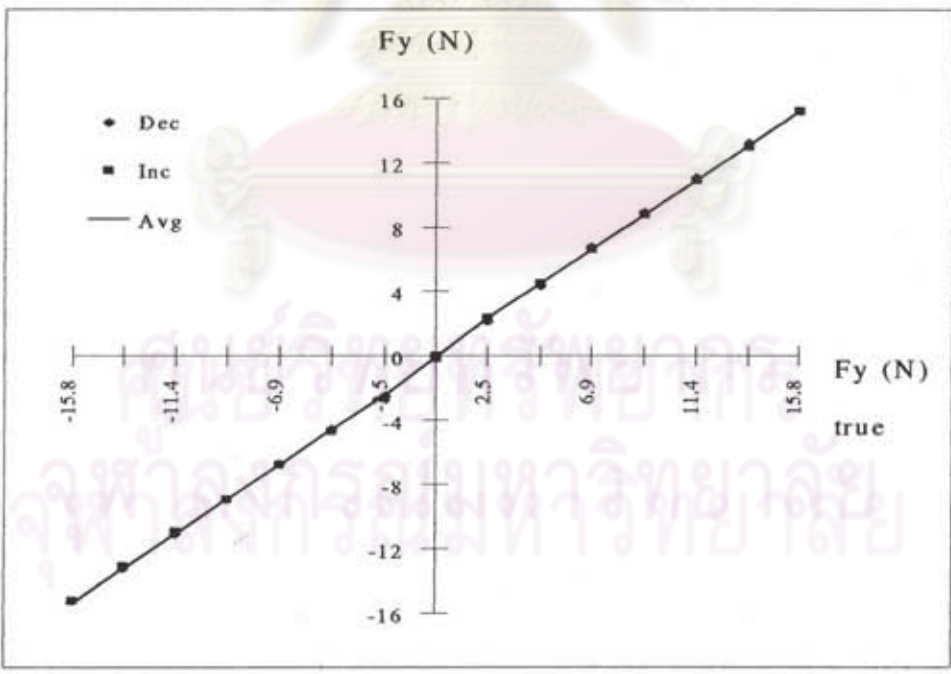
การทดลองวิธีหอะบิลิตี(Repeatability)						
แรงในแนวแกน X						
น้ำหนัก -2.055 ปอนด์ (-9.16 นิวตัน)				น้ำหนัก 2.055 ปอนด์ (9.16 นิวตัน)		
ครั้งที่	ปอนด์	นิวตัน		ครั้งที่	ปอนด์	นิวตัน
1	-1.989	-8.87		1	2.015	8.98
2	-1.978	-8.82		2	2.002	8.92
3	-1.998	-8.91		3	1.996	8.90
4	-1.983	-8.84		4	1.995	8.89
5	-1.99	-8.87		5	1.991	8.88
6	-1.993	-8.88		6	2.005	8.94
7	-1.999	-8.91		7	1.998	8.91
8	-2.016	-8.99		8	1.992	8.88
9	-2.009	-8.96		9	2.01	8.96
10	-2.015	-8.98		10	2.014	8.98
maximum		-8.82		maximum		8.98
average		-8.90		average		8.92
minimum		-8.99		minimum		8.88
repeatability max %		1.07		repeatability max %		0.68
repeatability avg. %		0.53		repeatability avg. %		0.37
แรงในแนวแกน Y						
น้ำหนัก -2.055 ปอนด์ (-9.16 นิวตัน)				น้ำหนัก 2.055 ปอนด์ (9.16 นิวตัน)		
ครั้งที่	ปอนด์	นิวตัน		ครั้งที่	ปอนด์	นิวตัน
1	-1.982	-8.84		1	1.953	8.71
2	-1.993	-8.88		2	1.964	8.75
3	-2.004	-8.93		3	1.975	8.80
4	-1.960	-8.74		4	1.958	8.73
5	-1.994	-8.89		5	1.972	8.79
6	-1.978	-8.82		6	1.935	8.63
7	-2.015	-8.98		7	1.948	8.68
8	-1.987	-8.86		8	1.970	8.78
9	-1.995	-8.89		9	1.967	8.77
10	-2.012	-8.97		10	1.981	8.83
maximum		-8.74		maximum		8.83
average		-8.88		average		8.75
minimum		-8.98		minimum		8.63
repeatability max %		1.55		repeatability max %		1.27
repeatability avg. %		0.90		repeatability avg. %		0.74

ตาราง 7.20 (ต่อ)

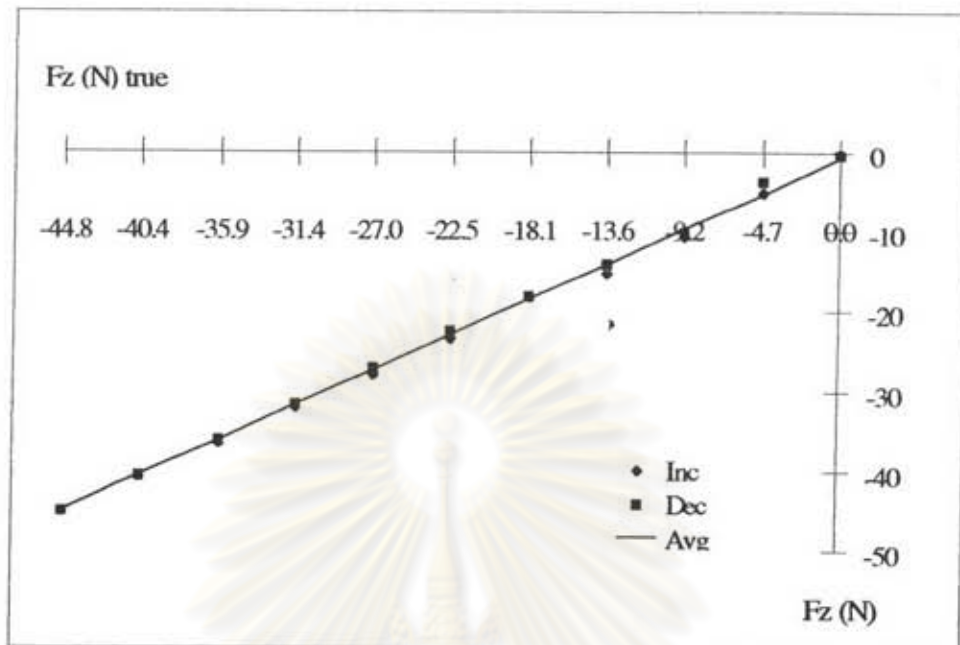
แรงโน้มถ่วงแกน Z			น้ำหนัก 6.75 ปอนด์ (30.09 นิวตัน)		
น้ำหนัก -3.055 ปอนด์ (-13.618 นิวตัน)			น้ำหนัก 6.75 ปอนด์ (30.09 นิวตัน)		
ครั้งที่	ปอนด์	นิวตัน	ครั้งที่	ปอนด์	นิวตัน
1	-4.137	-18.44	1	6.926	30.87
2	-4.238	-18.89	2	6.49	28.93
3	-4.192	-18.69	3	6.52	29.06
4	-4.172	-18.60	4	6.461	28.80
5	-4.186	-18.66	5	6.515	29.04
6	-4.111	-18.33	6	6.492	28.94
7	-4.061	-18.10	7	6.482	28.89
8	-4.205	-18.74	8	6.469	28.84
9	-4.252	-18.95	9	6.489	28.93
10	-4.131	-18.41	10	6.459	28.79
maximum		-18.10	maximum		30.87
average		-18.58	average		29.11
minimum		-18.95	minimum		28.79
repeatability max %		1.90	repeatability max %		3.66
repeatability avg. %		1.07	repeatability avg. %		3.10
โมเมนต์แกน Z			โมเมนต์ 1.498 นิวตันเมตร		
โมเมนต์ -1.498 นิวตันเมตร			โมเมนต์ 1.498 นิวตันเมตร		
ครั้งที่	นิวตันเมตร		ครั้งที่	นิวตัน	
1	-1.452		1	1.45	
2	-1.429		2	1.461	
3	-1.431		3	1.451	
4	-1.429		4	1.442	
5	-1.438		5	1.428	
6	-1.427		6	1.443	
7	-1.447		7	1.431	
8	-1.434		8	1.441	
9	-1.432		9	1.455	
10	-1.434		10	1.438	
maximum		-1.43	maximum		1.461
average		-1.44	average		1.444
minimum		-1.45	minimum		1.428
repeatability max %		0.72	repeatability max %		0.95
repeatability avg. %		0.48	repeatability avg. %		0.49



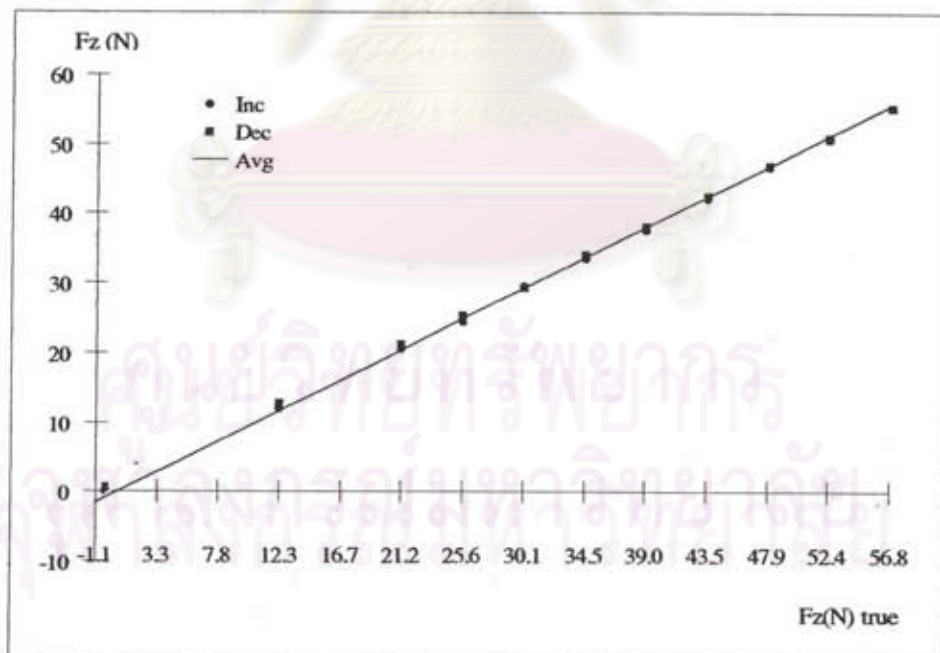
รูปที่ 7.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำจริงกับแรงที่วัดได้ในแนวแกน X



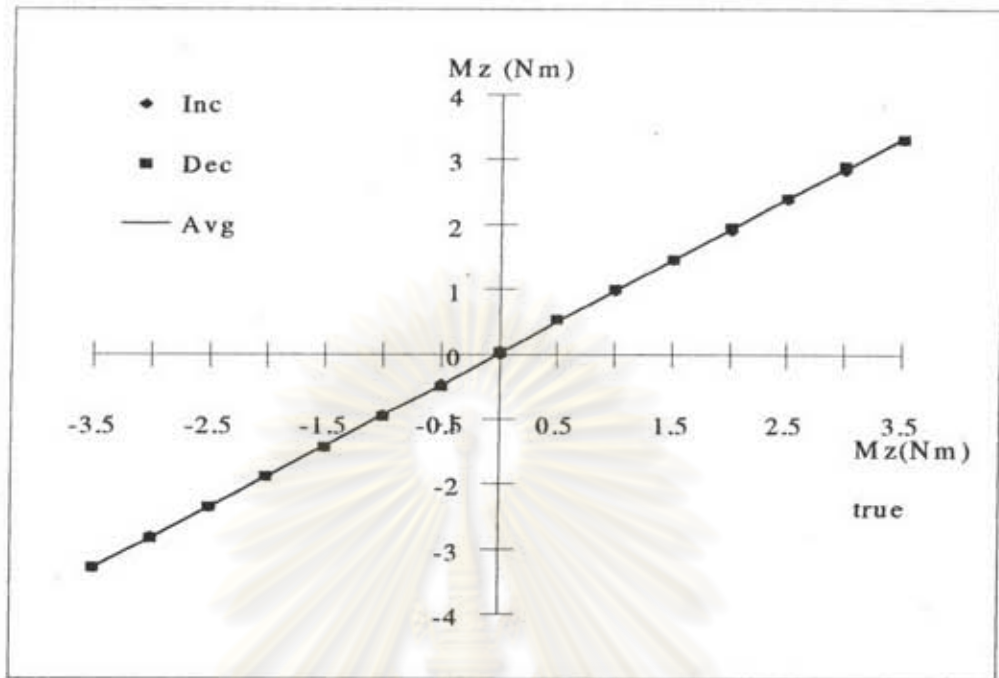
รูปที่ 7.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำจริงกับแรงที่วัดได้ในแนวแกน Y



รูปที่ 7.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำจริงกับแรงที่วัดได้ในแนวแกน -Z

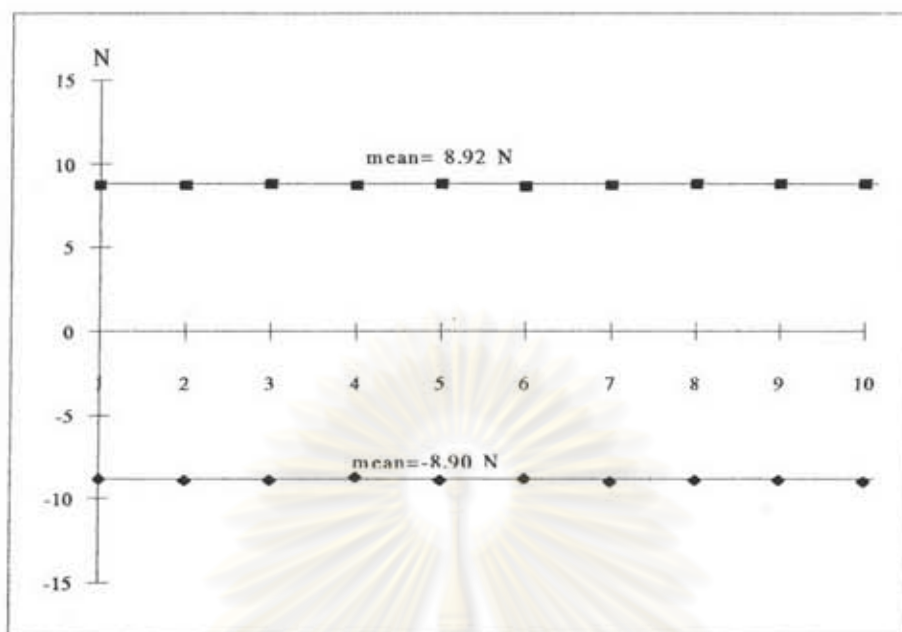


รูปที่ 7.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำจริงกับแรงที่วัดได้ในแนวแกน +Z

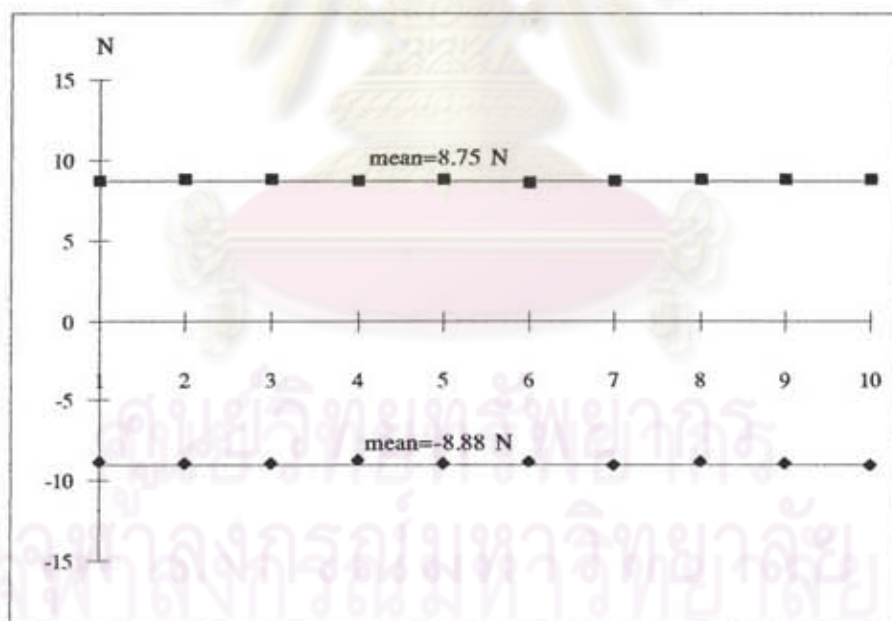


รูปที่ 7.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กระทำจริงกับโมเมนต์ที่วัดได้ในแนวแกน Z

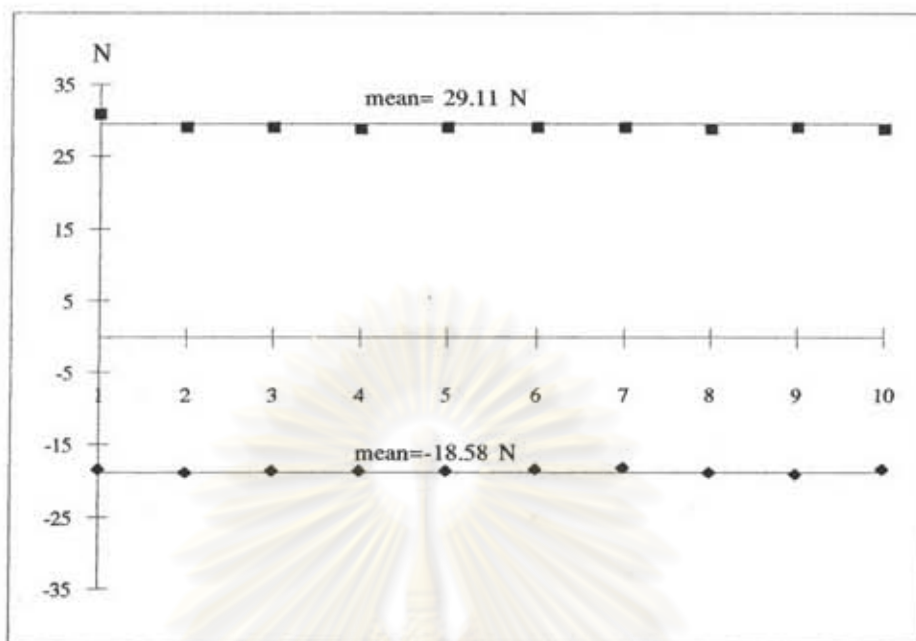
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



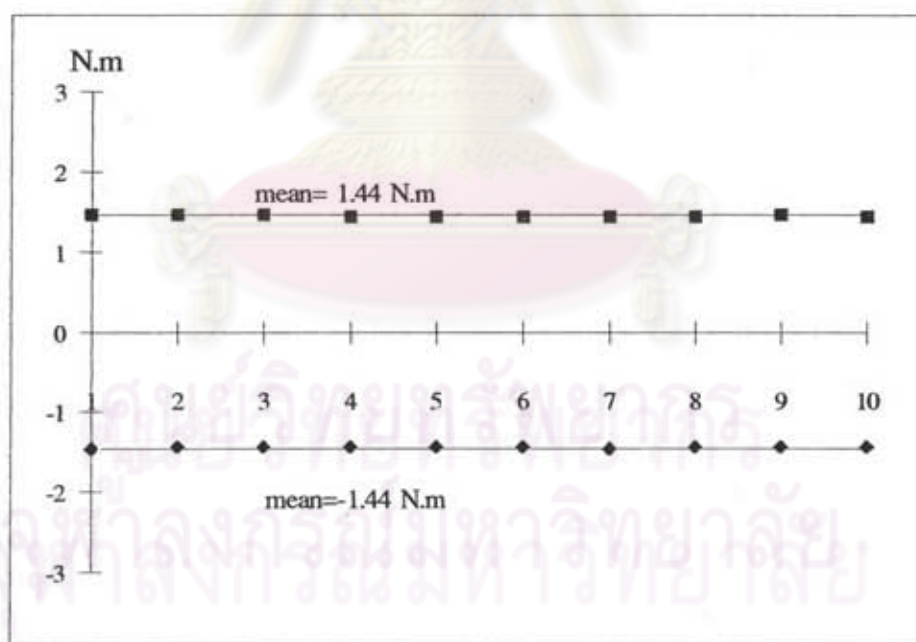
รูปที่ 7.26 รีพิทอะบิลิตีในแนวแกน X ขนาดแรงกระทำ -9.16 นิวตัน และ 9.16 นิวตัน



รูปที่ 7.27 รีพิทอะบิลิตีในแนวแกน Y ขนาดแรงกระทำ -9.16 นิวตัน และ 9.16 นิวตัน

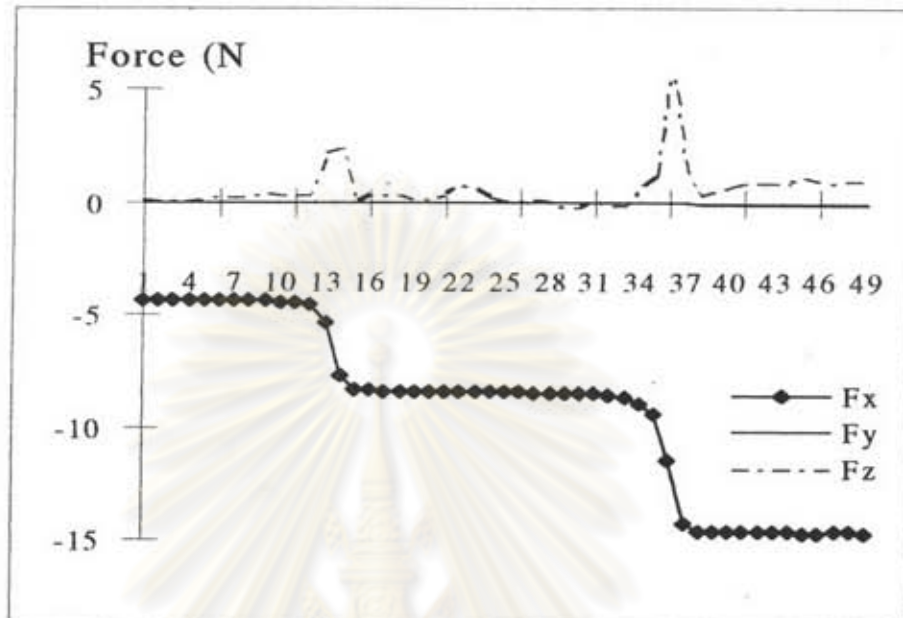


รูปที่ 7.28 รีพีทอะบิลิตีในแนวแกน Z ขนาดแรงกระทำ -13.62 นิวตัน และ 30.09 นิวตัน

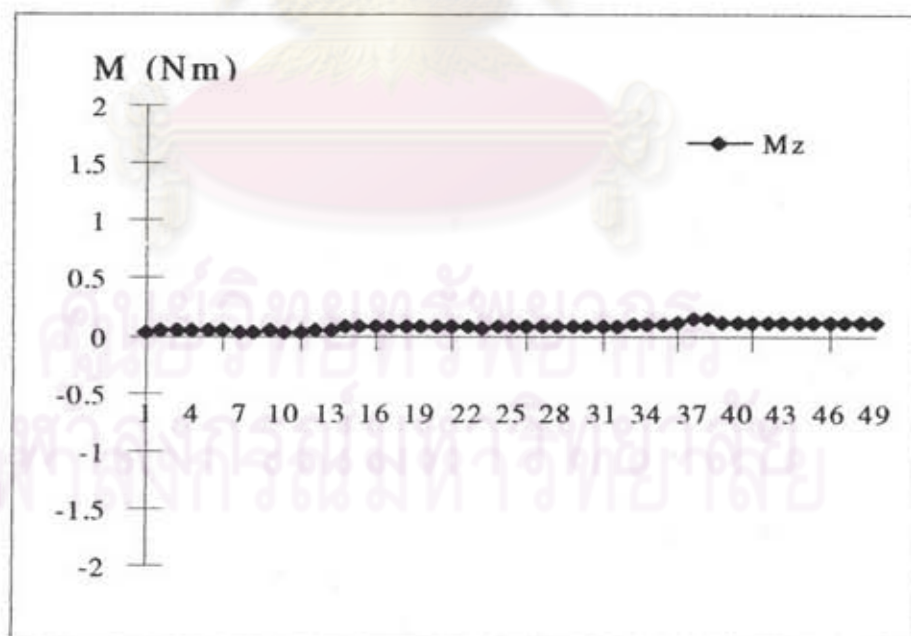


รูปที่ 7.29 รีพีทอะบิลิตีในแนวแกน Z ขนาดโมเมนต์กระทำ -1.498 และ 1.498 นิวตันเมตร

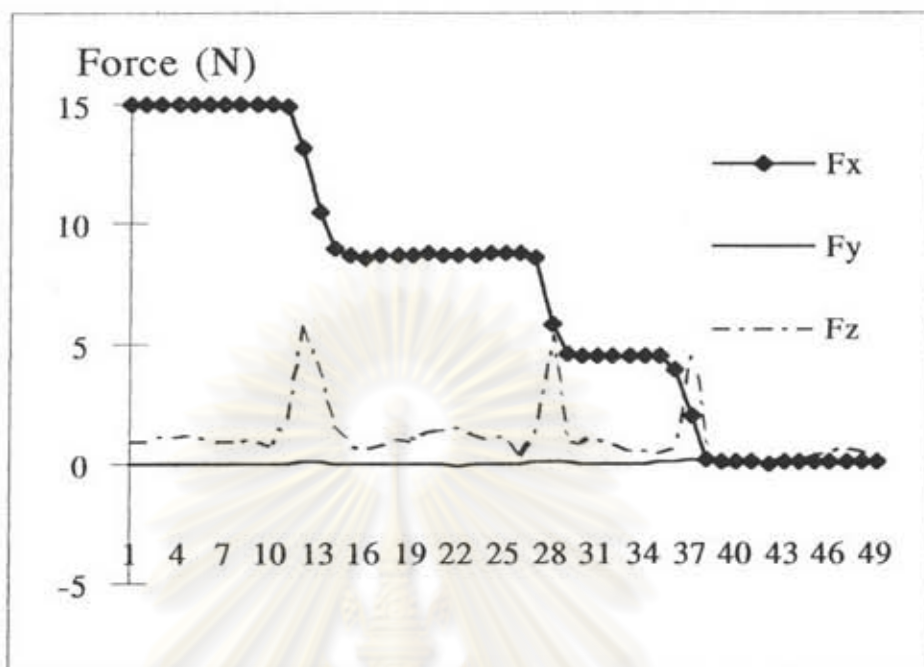
การทดสอบการวัดแรงในทิศทางต่างๆ (ข้อมูลการทดลอง คู ภาคผนวก ฉ)



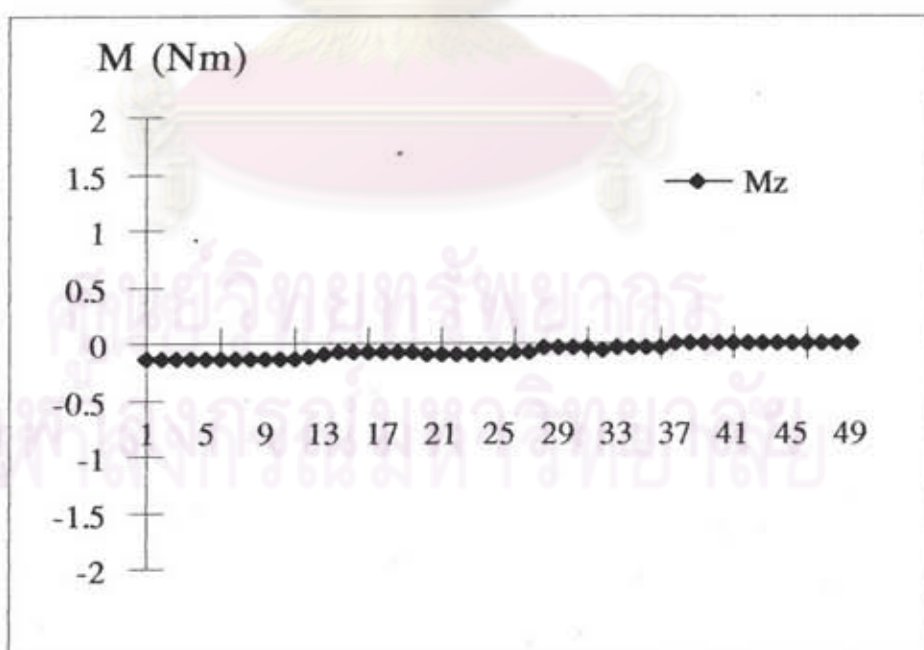
รูปที่ 7.30 แสดงผลการวัดแรงกระทำในแนวแกน X ขนาด -4.73, -9.18 และ -15.87 นิวตัน



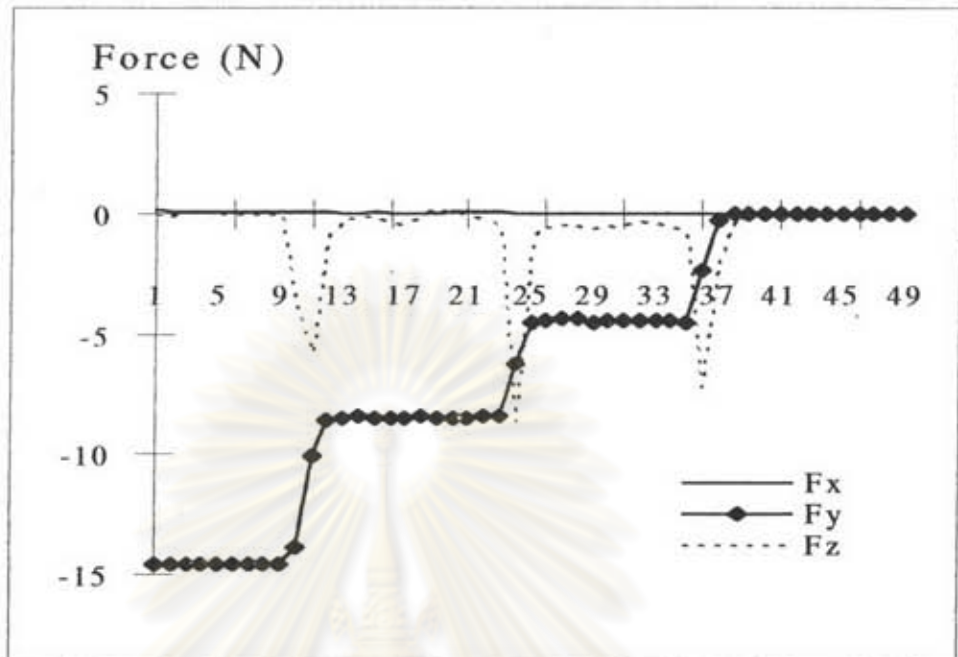
รูปที่ 7.31 แสดงค่าโมเมนต์ M_z เนื่องจากผลของแรงกระทำในแนวแกน X
ขนาด -4.73, -9.18 และ -15.87 นิวตัน



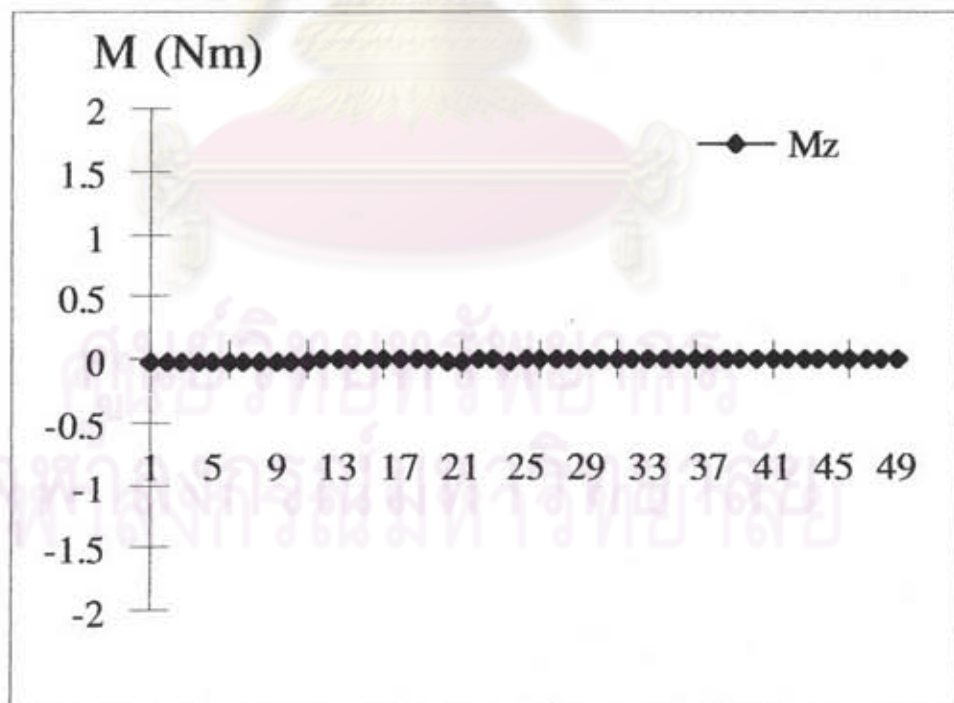
รูปที่ 7.32 แสดงผลการวัดแรงกระทำในแนวแกน X ขนาด 15.87, 9.18 และ 4.73 นิวตัน



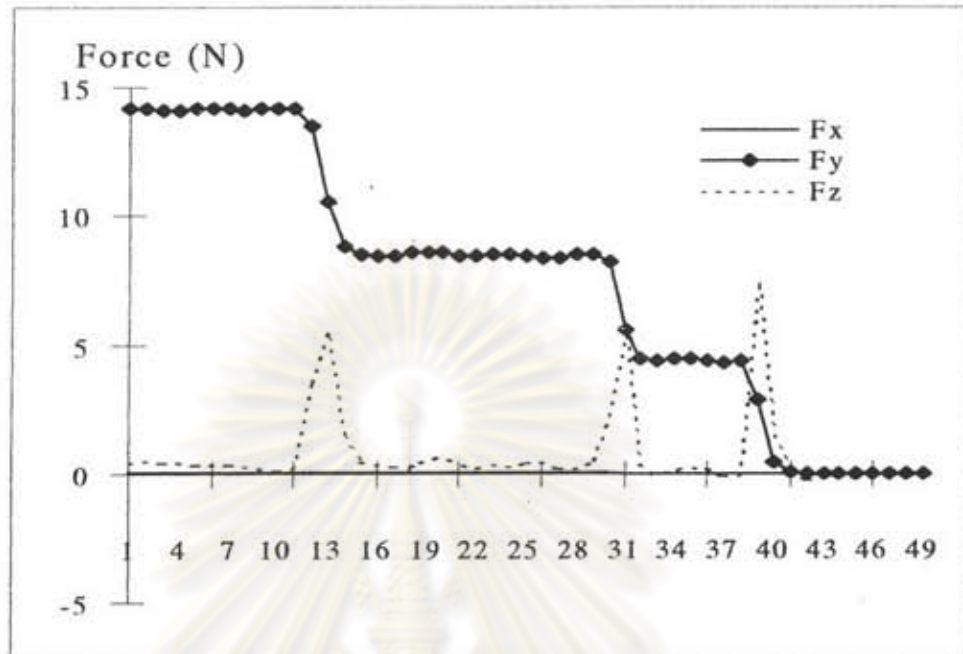
รูปที่ 7.33 แสดงค่าโมเมนต์ M_z เนื่องจากผลของแรงกระทำในแนวแกน X ขนาด 15.87, 9.18 และ 4.73 นิวตัน



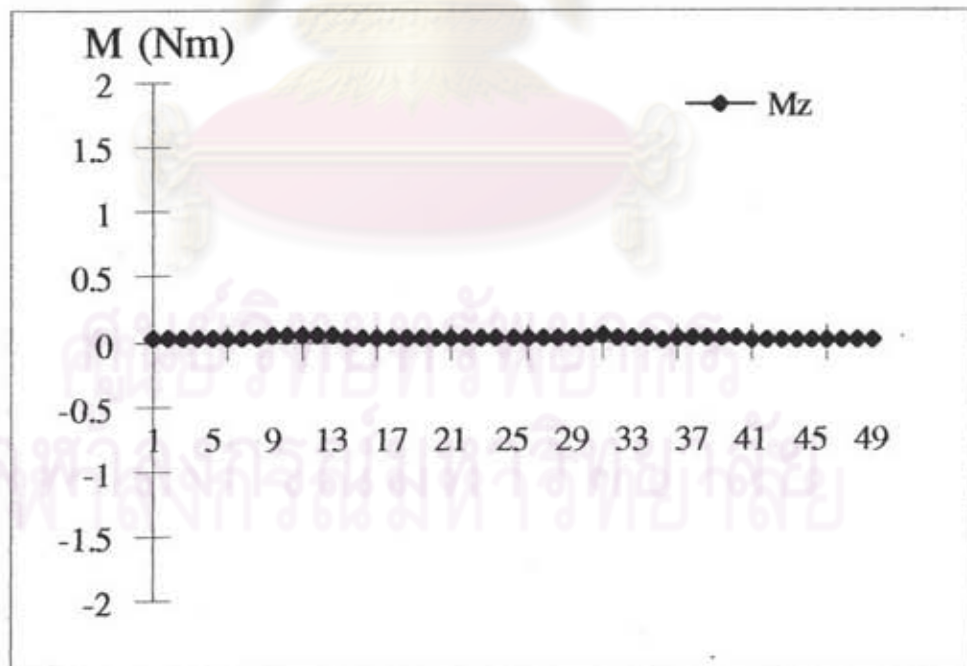
รูปที่ 7.34 แสดงผลการวัดแรงกระทำในแนวแกน Y ขนาด -15.87, -9.18 และ -4.73 นิวตัน



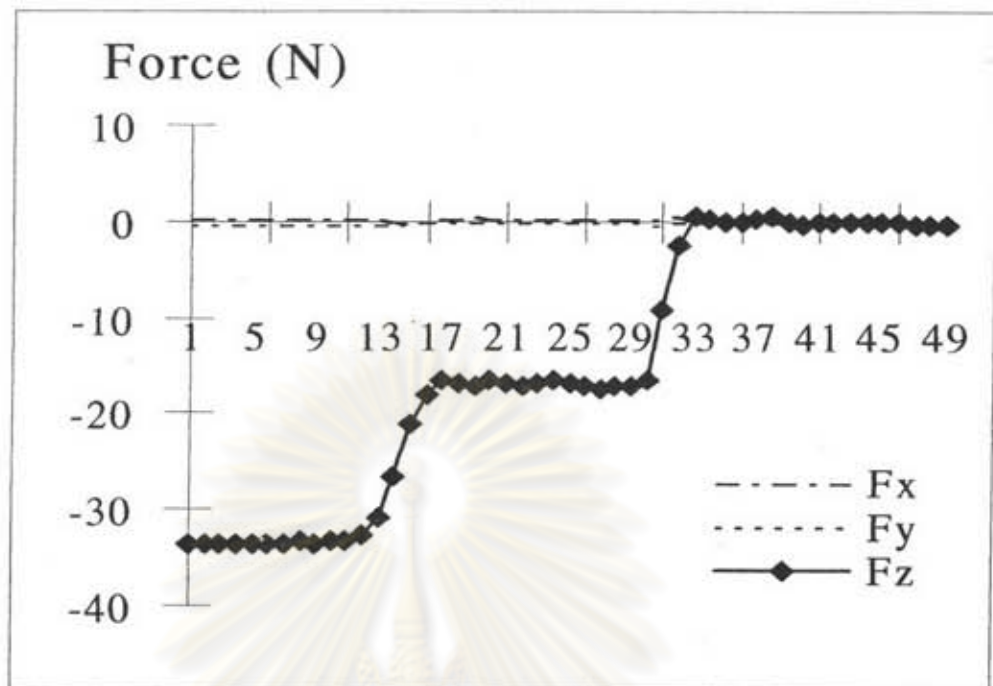
รูปที่ 7.35 แสดงค่าโมเมนต์ M_z เนื่องจากผลของแรงกระทำในแนวแกน Y ขนาด -15.87, -9.18 และ -4.73 นิวตัน



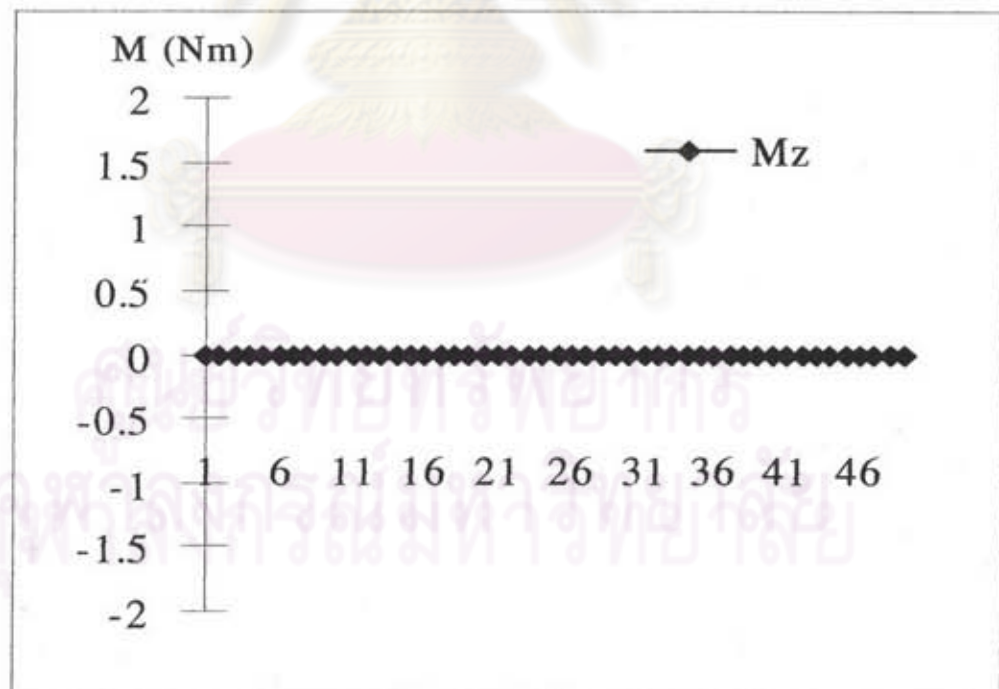
รูปที่ 7.36 แสดงผลการวัดแรงกระทำในแนวแกน Y ขนาด 15.87, 9.18 และ 4.73 นิวตัน



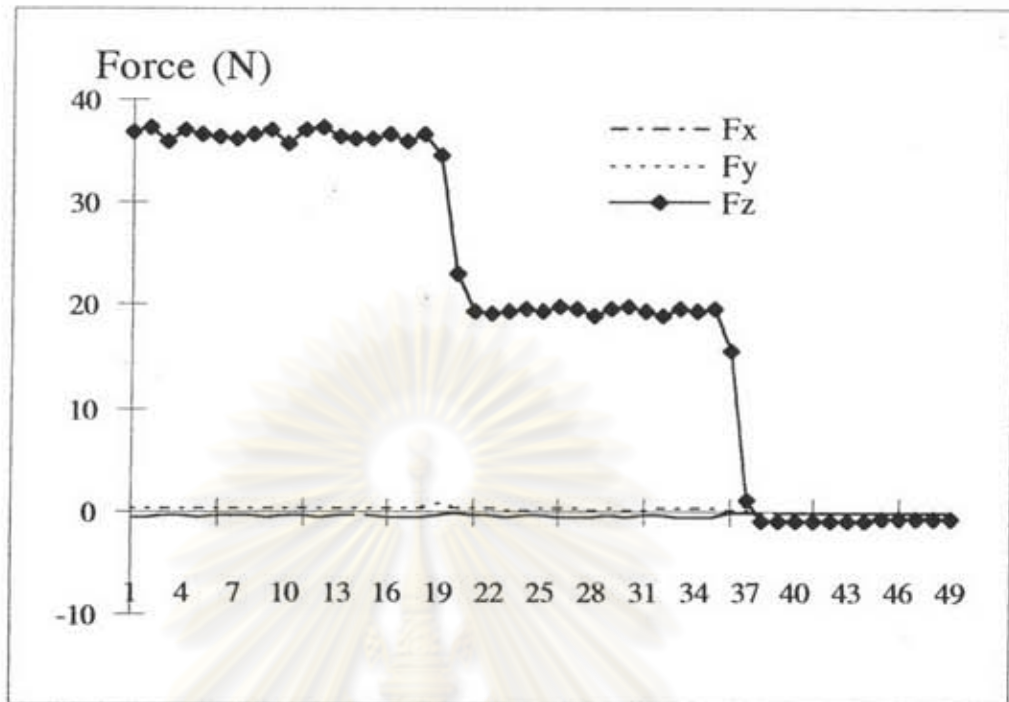
รูปที่ 7.37 แสดงค่าโมเมนต์ M_z เนื่องจากผลของแรงกระทำในแนวแกน Y ขนาด 15.87, 9.18 และ 4.73 นิวตัน



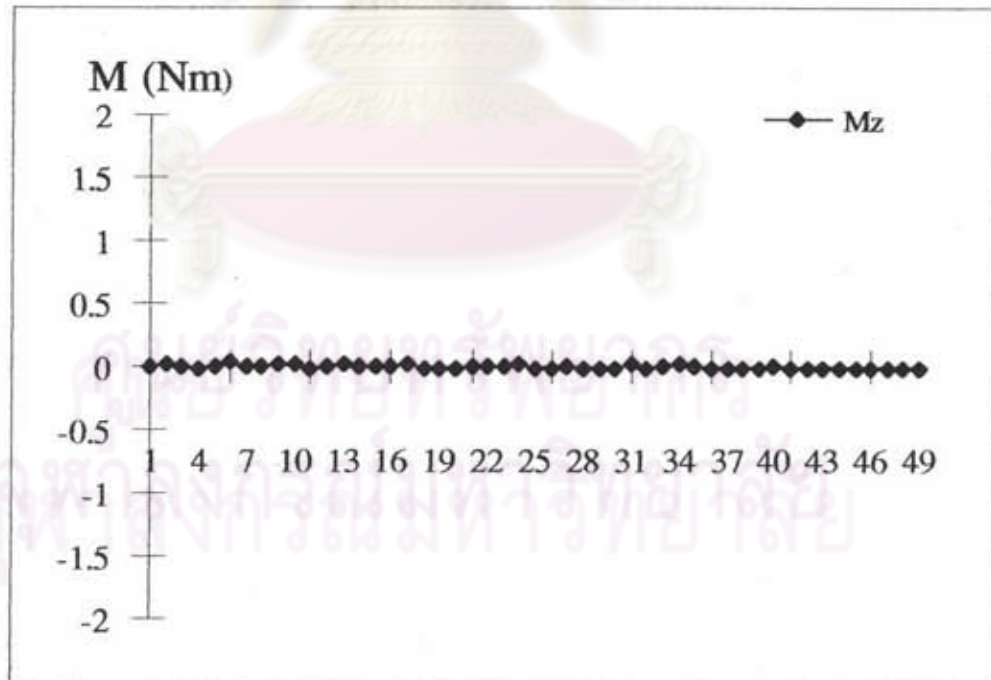
รูปที่ 7.38 แสดงผลการวัดแรงกระทำในแนวแกน Z ขนาด -35.93 และ -18.09 นิวตัน



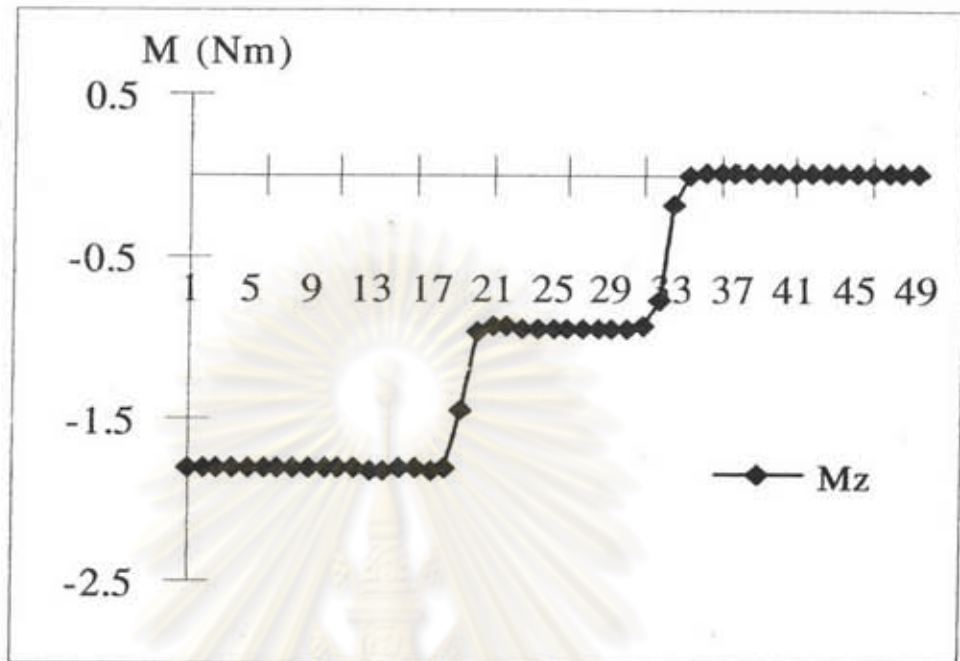
รูปที่ 7.39 แสดงค่าโมเมนต์ M_z เนื่องจากผลของแรงกระทำในแนวแกน Z ขนาด -35.93 และ -18.09 นิวตัน



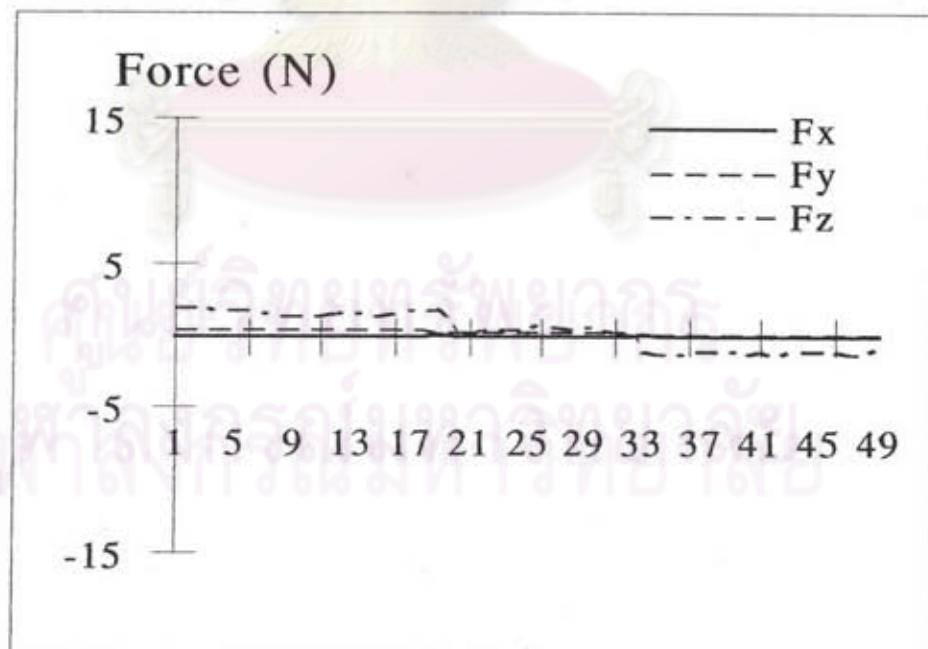
รูปที่ 7.40 แสดงผลการวัดแรงกระทำในแนวแกน Z ขนาด 35.93 และ 18.09 นิวตัน



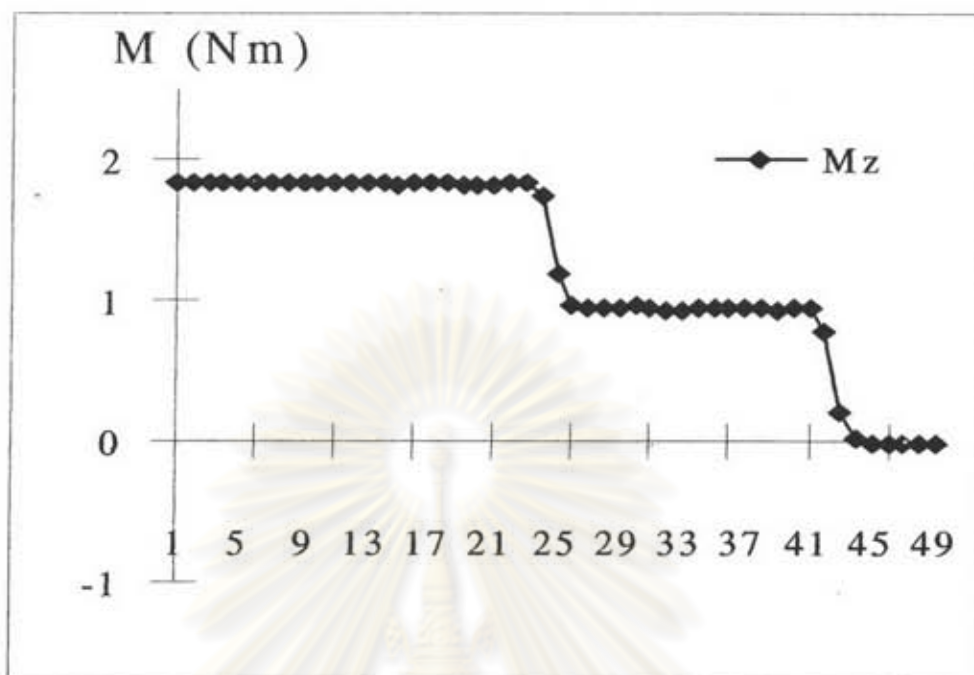
รูปที่ 7.41 แสดงค่าโมเมนต์ M_z เนื่องจากผลของแรงกระทำในแนวแกน Z
ขนาด 35.93 และ 18.09 นิวตัน



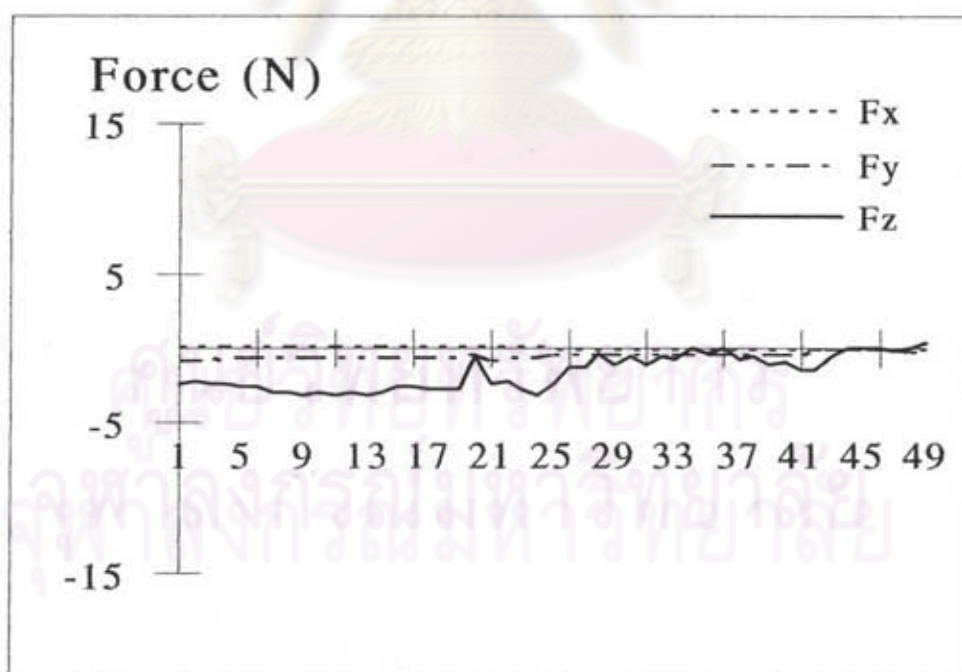
รูปที่ 7.42 แสดงผลการวัดโมเมนต์กระทำในแนวแกน Z ขนาด -1.99 และ -1.01 นิวตันเมตร



รูปที่ 7.43 แสดงค่าแรง F_x , F_y และ F_z เนื่องจากผลของโมเมนต์กระทำในแนวแกน Z ขนาด -1.99 และ -1.01 นิวตันเมตร



รูปที่ 7.44 แสดงผลการวัดโมเมนต์กระทำในแนวแกน Z ขนาด 1.99 และ 1.01 นิวตันเมตร



รูปที่ 7.45 แสดงค่าแรง F_x , F_y และ F_z เนื่องจากผลของโมเมนต์กระทำในแนวแกน Z ขนาด 1.99 และ 1.01 นิวตันเมตร

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากการทดลองในส่วนแรกจะเป็นการทดลองหาค่าคงที่ซึ่งแสดงคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดแรงในรูปของเมตริกซ์ที่เรียกว่าเมตริกซ์ปรับเทียบค่า R_F (calibration matrix) ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ไปเป็นแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้น โดยในการทดลองจะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงหรือโมเมนต์ที่กระทำกับค่าสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากชุดของอุปกรณ์ขยายสัญญาณของสเตรนเกจแต่ละชุด ซึ่งในการทดลองปรับเทียบค่านี้อาจทำการทดลองในลักษณะสแตติก โดยการออกแรงหรือโมเมนต์กระทำในแนวแกน X Y และ Z แล้วทำการวัดค่าสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าทั้ง 8 ค่าโดยในการวัดค่าแต่ละค่าจะทำการเฉลี่ยค่าสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการอ่านค่าหลายๆจุด ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่าค่าสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าของแรงหรือโมเมนต์ที่มากกระทำ

จากการทดลองปรับเทียบค่าของแรงในแนวแกน X และ แกน Y ที่กระทำที่ตำแหน่งศูนย์กลางของอุปกรณ์วัดแรง (เซนเซอร์เฟรม(S)) จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าน้อยมาก ในขณะที่ผลของแรงกระทำในแนวแกน Z และโมเมนต์ในแนวแกน X Y และ Z มีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจน ทำให้อุปกรณ์วัดแรงที่สร้างขึ้นนี้ไม่สามารถนำมาใช้ในการวัดค่าของแรงในแนวแกน X และแกน Y ได้โดยตรง ณ ที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของอุปกรณ์วัดแรง (Sensor frame) แต่เราสามารถทำการวัดค่าของแรงในแนวแกน X และ แกน Y ได้ ณ ที่ตำแหน่งที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลาง โดยอาศัยการเกิดโมเมนต์เนื่องจากแรงที่กระทำเนื่องจากจุดกึ่งกลางของอุปกรณ์วัดแรง (ณ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางเฟรมของเครื่องมือทำงาน) ซึ่งเราจะสามารถวัดค่าของแรงในแนวแกน X ได้โดยการวัดค่าโมเมนต์ในแนวแกน Y และวัดค่าของแรงในแนวแกน Y โดยอาศัยการวัดค่าของโมเมนต์ในแนวแกน X

จากลักษณะคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดแรงที่สร้างขึ้นมาดังกล่าวทำให้การหาค่าของเมตริกซ์ R_F ลดรูปขนาดของเมตริกซ์ลงเหลือขนาด 4×8 สำหรับใช้ในการหาค่าของแรงในแนวแกน Z และโมเมนต์ในแนวแกน X Y Z ตามลำดับ ส่วนในการปรับเทียบค่าเพื่อหาเมตริกซ์ปรับเทียบค่าซูโดอินเวอร์ส (Pseudoinverse calibration matrix) R_F^* ขนาด 8×4 เพื่อใช้ในการหาเมตริกซ์ปรับเทียบค่า R_F นั้นเราจะใช้การปรับเทียบค่าเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงและโมเมนต์ที่กระทำกับสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า W_1 ถึง W_8 ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงในแนวแกน Z และโมเมนต์ในแนวแกน X Y และ Z ดังรายละเอียดผลการปรับเทียบค่าต่อไปนี้

การปรับเทียบค่า

จากรูปที่ 7.1 ถึง 7.20 จะแสดงกราฟของความสัมพันธ์(วิธีการกำลังสองน้อยที่สุด) จากการปรับเทียบค่าแรง F_z และ โมเมนต์ M_x M_y M_z กับสัญญาณความต่างศักย์จากสเตรนเกจเฉพาะจุดที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากเท่านั้น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ในการปรับเทียบค่าของโมเมนต์ในแนวแกน X จะพบว่าโมเมนต์ในแนวแกน X จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าในชุดของสเตรนเกจ W_3 W_4 W_7 และ W_8 ซึ่งมีค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า $W_3=0.092$ $W_4=1.950$ $W_7 = -0.019$ $W_8= 1.978$ โวลท์ ตามลำดับ โดยมีช่วงในการทดสอบโมเมนต์ระหว่าง -2.4 นิวตันเมตร ถึง 2.4 นิวตันเมตร

ในการปรับเทียบค่าของโมเมนต์ในแนวแกน Y จะพบว่าโมเมนต์ในแนวแกน Y จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าในชุดของสเตรนเกจ W_1 W_2 W_3 W_6 และ W_7 ซึ่งมีค่าความชันของความสัมพันธ์ $W_1= 0.083$ $W_2= 1.896$ $W_3= 0.032$ $W_6= -1.809$ $W_7= 0.047$ โวลท์ โดยมีช่วงในการทดสอบโมเมนต์ ระหว่าง -2.4 นิวตันเมตร ถึง 2.4 นิวตันเมตร

ในการปรับเทียบค่าของโมเมนต์ในแนวแกน Z จะพบว่าโมเมนต์ในแนวแกน Z จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าในชุดของสเตรนเกจ W_1 W_3 W_5 W_6 W_7 และ W_8 ซึ่งมีค่าความชันของความสัมพันธ์ $W_1=1.047$ $W_3 = 1.074$ $W_5 = 1.020$ $W_6 = -0.030$ $W_7 = -1.005$ และ $W_8= -0.050$ โวลท์ โดยมีช่วงในการทดสอบโมเมนต์ ระหว่าง -3.4 นิวตันเมตร ถึง 3.4 นิวตันเมตร

ในการปรับเทียบค่าของแรงในแนวแกน Z จะพบว่าแรงในแนวแกน Z จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าในชุดของสเตรนเกจ W_2 W_4 W_6 และ W_8 ซึ่งมีค่าความชันของความสัมพันธ์ $W_2= -0.020$ $W_4 = -0.019$ $W_6 = -0.020$ และ $W_8 = -0.023$ โวลท์ โดยมีช่วงในการทดสอบแรง ระหว่าง -44.8 นิวตัน ถึง 55.5 นิวตัน

สำหรับช่วงในการทดสอบโมเมนต์จะถูกจำกัดด้วยความเครียดและอัตราขยายที่สัมพันธ์กับช่วงในการวัดค่าของอุปกรณ์วัดและแปลงสัญญาณแบบ A/D ที่ใช้ (5 โวลท์) ส่วนในการปรับเทียบแรงในแนวแกน Z มีขีดจำกัดที่ความสามารถของชุดโต๊ะทดสอบปรับเทียบค่า ที่ไม่สามารถออกแรงกระทำได้สูงพอ

การหาค่าอิทธิพลอันดับเมตริกซ์

จากค่าของความชันของความสัมพันธ์เราสามารถจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและ โมเมนต์กับสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากชุดขยายสัญญาณของสเตรนเกจ ที่เรียกว่า ชุดอินเวอร์สคาลิเบรชันเมตริกซ์ R_F^* ดังต่อไปนี้

$$R_F^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.0828 & 1.0466 \\ -0.0199 & 0 & 1.8966 & 0 \\ 0 & 0.0919 & 0.0315 & 1.074 \\ -0.0191 & -1.9503 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0187 & 0 & 1.0197 \\ -0.0203 & 0 & -1.8096 & -0.0298 \\ 0 & 0.2023 & 0.0474 & -1.0046 \\ -0.0231 & 1.9785 & 0 & -0.0498 \end{bmatrix}$$

จากผลการเปรียบเทียบค่าเราจะเห็นว่าสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสเตรนเกจชุดที่ติดตั้งอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแรงและ โมเมนต์จะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของสเตรนเกจในระนาบอื่นๆ โดยจะเห็นว่าผลการเปรียบเทียบแรง F_z จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะสเตรนเกจในระนาบที่ตั้งฉากเท่านั้นแต่มีขนาดที่ต่ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากความแข็งแรงของ โครงสร้างมีค่าสูงในแนวแกน Z นั้นเอง ส่วนการเปรียบเทียบโมเมนต์ ค่าของการเปลี่ยนแปลงความชันจะมีค่าสูงโดยเฉพาะสเตรนเกจที่ติดตั้งในระนาบที่ตั้งฉาก แต่จะพบว่าสเตรนเกจที่ติดตั้งในระนาบอื่น บางชุดจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นด้วยแต่ในขนาดที่ต่ำกว่า ซึ่งขึ้นอยู่กับสาเหตุบางอย่าง เช่น ความคลาดเคลื่อนจากการประกอบอุปกรณ์วัดแรง การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงกับ โด๊ะทดสอบไม่ได้แนวเดียวกัน ทำให้แนวแรงหรือโมเมนต์ไม่สมมาตรกับโครงสร้าง การติดตั้งสเตรนเกจไม่อยู่ในแนวเดียวกัน

จากเมตริกซ์ R_F^* ทำการแปลงเพื่อหาค่าเมตริกซ์ปรับเทียบค่า R_F ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับค่าของแรงและ โมเมนต์ที่ต้องการหาจากสมการ

$$R_F = [(R_F^*)^T \cdot R_F^*]^{-1} (R_F^*)^T$$

จะได้เมตริกซ์ปรับเทียบค่า R_F

$$R_F = \begin{bmatrix} -0.213 & -11.548 & -0.165 & -12.506 & -0.226 & -12.107 & 0.344 & -12.357 \\ 0.007 & -0.013 & 0.019 & -0.265 & 0.004 & -0.013 & 0.019 & 0.241 \\ 0.007 & 0.274 & 0 & -0.001 & -0.004 & -0.265 & 0.011 & -0.002 \\ 0.244 & -0.004 & 0.251 & -0.008 & 0.237 & 0.005 & -0.233 & 0.006 \end{bmatrix}$$

จากเมตริกซ์ปรับเทียบค่าจะเห็นว่าจากการที่การเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยต่อแรงในแนวแกน Z ทำให้ค่าของเมตริกซ์ในแถวที่หนึ่งที่ใช้ในการหาค่าแรง F_Z มีค่าสูงเมื่อเทียบกับแถวอื่นหรืออีกนัยหนึ่งคือการเปลี่ยนแปลงที่มีค่าน้อยก็ต้องทำการขยายสัญญาณในอัตราที่สูงเพื่อให้สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ ส่วนในแถวอื่นๆ จะเห็นว่าสมาชิกของเมตริกซ์ที่มีค่ามากจะเป็นสเตรนเกจที่อยู่ในระนาบที่ตั้งฉาก ส่วนสมาชิกตัวอื่นจะมีค่าน้อยมาก และจากเมตริกซ์ที่ได้นี้เมื่อนำไปคูณกับเมตริกซ์ของสัญญาณไฟฟ้าขนาด 8×1 ที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบแปลงสัญญาณเชิงเส้นไปเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขของเครื่องคอมพิวเตอร์จะได้ค่าของแรง F_Z โมเมนต์ M_x , M_y และ M_z ตามลำดับ

ค่าไวโซลูชัน

จากผลการทดลองปรับเทียบค่าเพื่อหาเมตริกซ์ R_F จะพบว่าอุปกรณ์วัดแรงที่สร้างขึ้นมาสามารถนำไปใช้ในการวัดค่าแรงในแนวแกน Z และวัดค่าโมเมนต์ในแนวแกน X Y และ Z โดยในการพิจารณาเพื่อหาค่าไวโซลูชันเราจะพิจารณาจากชุดของสเตรนเกจที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดต่อแรงหรือโมเมนต์ที่มากกระทำ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟที่ได้จากการปรับเทียบค่า จะพบว่าอุปกรณ์วัดแรงจะมีค่าความไว (Sensitivity) ต่อค่าของแรงในแนวแกน Z ประมาณ 0.02 โวลต์ต่อนิวตัน และค่าความไวต่อโมเมนต์ในแนวแกน X Y และ Z เท่ากับ 1.97 1.85 และ 1.05 โวลต์ต่อนิวตันเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าอุปกรณ์วัดแรงที่สร้างขึ้นมานี้จะมีความไวต่อแรงในแนวแกน Z ในขนาดที่ต่ำ เมื่อเทียบกับความไวต่อโมเมนต์ในแนวแกน X Y และ Z ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะของโครงสร้างมีความแข็งแรงทำให้ยุบตัวได้น้อยเมื่อมีแรงกระทำในแนวแกน Z ในการทดลองเราใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณ A/D ขนาดความละเอียด 12 บิต ช่วงในการวัด ± 5 โวลต์ เมื่อคิดเป็นค่าไวโซลูชันจะได้ค่าไวโซลูชันการวัดค่าแรง F_Z เท่ากับ 0.12 นิวตัน และ ค่าไวโซลูชันการวัดโมเมนต์ M_x , M_y เท่ากับ 0.001 นิวตันเมตร และ โมเมนต์ M_z เท่ากับ 0.002 นิวตันเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าไวโซลูชันในการวัดโมเมนต์มีความละเอียดมากสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ได้เป็นอย่างดี ส่วนการวัดค่าแรง F_Z เนื่องจากค่าไวโซลูชันมีค่ามากทำให้ไม่สามารถวัดการ

เปลี่ยนแปลงค่าของแรงในขนาดต่ำได้ สำหรับการปรับปรุงค่ารีโซลูชันในการวัดแรงในแนวแกน Z สามารถทำได้โดยการเพิ่มอัตราขยายของชุดขยายสัญญาณของสเตรนเกจ W_2 W_4 W_6 และ W_8 และควรเพิ่มช่วงในการวัดค่าให้สูงขึ้นด้วย เนื่องจากสเตรนเกจที่ใช้ในการวัดแรง F_z และสเตรนเกจที่ใช้วัด โมเมนต์ M_x และ M_y เป็นสเตรนเกจชุดเดียวกัน การเพิ่มอัตราขยายจะทำให้สามารถวัดค่าโมเมนต์ได้ลดลงเนื่องจากถูกจำกัดด้วยช่วงในการวัดของอุปกรณ์แปลงสัญญาณ A/D และนอกจากนี้วิธีการที่จะปรับปรุงค่ารีโซลูชัน ทำได้โดยการเปลี่ยนไปใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณที่มีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงได้ดีขึ้นนั่นเอง

ผลการทดสอบคุณสมบัติสแตติกของอุปกรณ์วัดแรง

ในการทดสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดแรงเพื่อความสะดวกในการทดสอบเราจะทำการทดสอบในรูปของแรงที่กระทำที่จุดกำเนิดของโคออร์ดิเนตเฟรมที่แทนจุดปลายของเครื่องมือทำงานของแขนกล ที่เรียกว่า (Tool Frame) ที่ระยะห่าง 0.15 เมตร ซึ่งเราสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของโมเมนต์ที่จุดศูนย์กลางของอุปกรณ์วัดแรง (Sensor Frame) โดยแรงในทิศทางแกน X (F_x) ที่จุดปลายของเครื่องมือทำงานจะทำให้เกิด โมเมนต์ $-M_y$ ที่จุดศูนย์กลางของเซนเซอร์เฟรมและแรงในทิศทางแกน Y (F_y) จะทำให้เกิด โมเมนต์ M_x ที่จุดศูนย์กลางเซนเซอร์เฟรม และจากค่าโมเมนต์ที่วัดได้ที่จุดศูนย์กลางเซนเซอร์เฟรมนี้ จะทำการแปลงให้อยู่ในรูปของแรงที่กระทำที่จุดกำเนิดของทูลเฟรมดังกล่าว ส่วนแรงและ โมเมนต์ในแนวแกน Z สามารถทำการทดสอบได้แบบเดียวกับการเปรียบเทียบค่า เนื่องจากเราสามารถทำการย้ายแรงและ โมเมนต์ในแนวแกน Z ที่เซนเซอร์เฟรมไปที่ทูลเฟรมได้โดยตรง

ค่าความแม่นยำ (Accuracy)

จากตารางแสดงผลการทดลองที่ 7.1 แสดงค่าความแม่นยำในการวัดแรงและ โมเมนต์ที่ทูลเฟรม จากตารางจะพบว่าค่าความแม่นยำทั้งสองชนิด สำหรับการวัดแรง F_x F_y และ โมเมนต์ M_z จะมีค่าต่ำเมื่อแรงกระทำมีค่าน้อยและค่ามีค่าสูงขึ้นเมื่อแรงกระทำมากขึ้น โดยจะมีค่าความแม่นยำในการวัดแรงในแนวแกน X สูงสุดที่ 5.6 เปอร์เซ็นต์ (% FSO) ที่แรงกระทำ -3.56 ปอนด์ (15.8 นิวตัน) ในการวัดแรงในแนวแกน Y มีค่าความแม่นยำสูงสุดที่ -4.16 เปอร์เซ็นต์ (% FSO) ที่แรงกระทำ 3.56 ปอนด์ (15.8 นิวตัน) ส่วนค่าความแม่นยำสำหรับการวัด โมเมนต์ในแนวแกน Z จะมีค่าสูงสุดที่ 5.07 เปอร์เซ็นต์ (% FSO) ที่โมเมนต์ -3.46 นิวตันเมตร ส่วนค่าความแม่นยำสำหรับการวัดค่าแรงในแนวแกน Z จะมีค่าสูงสุดที่ -3.5 เปอร์เซ็นต์ (% FSO) ที่แรงกระทำ -3.06 ปอนด์ (13.6 นิวตัน) และจากการพิจารณาค่าความแม่นยำในรูปของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เทียบกับค่าจริง (% reading) แล้วจะพบว่าค่าการวัดค่าแรง F_z จะมีค่าผิดพลาดมาก ที่แรงกระทำขนาดเล็ก ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากวิธีการออกแรงกระทำที่ใช้เราใช้ก้อนน้ำหนักถ่วงหรือวางให้เกิดแรง

กระทำที่อุปกรณ์วัดแรงซึ่งในขณะทดลองที่แรงกระทำน้อย ก้อนน้ำหนักมีความเฉื่อยน้อยอาจเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายทำให้แรงไม่ตรงจุดศูนย์กลางของอุปกรณ์วัดแรง ซึ่งทำให้เกิดค่าผิดพลาดได้ และนอกจากนี้จะพบว่าค่าของแรง F_z จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ทั้งนี้เนื่องมาจากการขยายสัญญาณมีอัตราขยายสูงทำให้สัญญาณรบกวนต่างๆ มีผลต่อการวัดค่าแรงในแนวแกน Z และนอกจากนี้ความเคลื่อนที่ต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความแม่นยำ ยังมีสาเหตุเนื่องมาจากผลการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ (Voltage drift or Drift noise) ที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือ เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

จากลักษณะของค่าความแม่นยำดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์วัดแรงที่ได้ มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ โดยในการวัดค่าแรง F_x F_y F_z และ โมเมนต์ M_z ที่ตำแหน่งทูลเฟรม จะให้ค่าผิดพลาดในการวัดน้อยมากไม่เกิน 5.6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์แบบเต็มสเกล (%FSO) โดยในการวัดแรง F_z จะเหมาะสำหรับการวัดแรงกระทำในขนาดที่สูงและไม่ต้องการความละเอียดมากนัก

ค่าฉิเนียร์ตี (Linearity)

การแสดงค่าฉิเนียร์ตี จะใช้วิธีการแสดงค่าฉิเนียร์ตีแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least square linearity) และนอกจากนี้ก็พิจารณาถึงค่าความชัน จุดตัด และค่าฉิเนียร์ตีที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลซึ่งพิจารณาจากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงหรือ โมเมนต์กระทำจริง ณ ตำแหน่งทูลเฟรม กับค่าแรงหรือ โมเมนต์ที่อ่านได้จากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ ดังต่อไปนี้

รูปที่ 7.21 แสดงความสัมพันธ์ของการวัดแรงในแนวแกน X จะพบว่ามีค่าความเป็นเชิงเส้นเท่ากับ -2.51% ที่แรงกระทำ -15.8 นิวตัน ความชันของความสัมพันธ์เท่ากับ 0.98 จุดตัดกราฟที่ 0.09 นิวตัน และฉิเนียร์ตีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล (correlation) เท่ากับ 1

รูปที่ 7.22 แสดงความสัมพันธ์ของการวัดแรงในแนวแกน Y จะพบว่ามีค่าความเป็นเชิงเส้นเท่ากับ 1.26%FSO ที่แรงกระทำ -2.5 นิวตัน ความชันของความสัมพันธ์เท่ากับ 0.97 จุดตัดกราฟที่ -0.06 นิวตัน ฉิเนียร์ตีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเท่ากับ 1

รูปที่ 7.23 แสดงความสัมพันธ์ของการวัดแรงในแนวแกน Z จะพบว่ามีค่าความเป็นเชิงเส้นเท่ากับ -3.23%FSO ที่แรงกระทำ -4.7 นิวตัน ความชันของความสัมพันธ์เท่ากับ 0.99 จุดตัดกราฟที่ -0.55 นิวตัน ฉิเนียร์ตีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเท่ากับ 1

รูปที่ 7.24 แสดงความสัมพันธ์ของการวัดโมเมนต์ในแนวแกน Z จะพบว่ามีค่าความเป็นเชิงเส้นเท่ากับ -0.85%FSO ที่โมเมนต์กระทำ 3 นิวตันเมตร ความชันของความสัมพันธ์เท่ากับ 1.0 จุดตัดกราฟที่ 0.02 นิวตันเมตร ฉิเนียร์ตีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเท่ากับ 1

จากลักษณะของกราฟโดยรวมแล้วจะเห็นว่าอุปกรณ์วัดแรงที่ได้ให้ผลการวัดค่าแรงและโมเมนต์ที่กระทำมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ดีมาก โดยมีค่าลิเนียร์ตีสูงสุดในการวัดแรง F_z มีค่าเท่ากับ -3.23 เปอร์เซ็นต์ (% FSO) ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของการตอบสนองของอุปกรณ์วัดแรงซึ่งเราจะสังเกตได้จากขั้นตอนการปรับเทียบค่า มีความเป็นเส้นตรง และนอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าผลของไฮสเตรซิสมีน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นผลได้ชัดเจน ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวจะทำให้การวัดค่าและคำนวณหาค่าแรงและโมเมนต์ทำได้สะดวกและรวดเร็ว

ค่ารีพีทอะบิลิตี (Repeatability)

จากตารางที่ 7.2 และกราฟรูปที่ 7.26 ถึง 7.29 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่ารีพีทอะบิลิตีจากการออกแรงหรือโมเมนต์กระทำขนาดคงที่ค่าเดิมหลายๆครั้ง โดยในการทดลองจะต้องเริ่มจากการปรับสมดุลแล้วจึงจะเริ่มการทดลอง จากการทดลองพบว่าค่ารีพีทอะบิลิตี (%FSO) ของการวัดแรงและโมเมนต์มีค่าต่างๆดังนี้

การทดลองรีพีทอะบิลิตีในการวัดแรงแนวแกน X มีค่ารีพีทอะบิลิตี 1.07 % ในแนวแรงด้านลบ และค่ารีพีทอะบิลิตี 0.68% ในแนวแรงด้านบวก

การทดลองรีพีทอะบิลิตีในการวัดแรงแนวแกน Y มีค่ารีพีทอะบิลิตี 1.55 % ในแนวแรงด้านลบ และค่ารีพีทอะบิลิตี 1.27 % ในแนวแรงด้านบวก

การทดลองรีพีทอะบิลิตีในการวัดแรงแนวแกน Z มีค่ารีพีทอะบิลิตี 1.90 % ในแนวแรงด้านลบ และค่ารีพีทอะบิลิตี 3.66 % ในแนวแรงด้านบวก

การทดลองรีพีทอะบิลิตีในการวัดโมเมนต์ในแนวแกน Z มีค่ารีพีทอะบิลิตี 0.72% ในแนวแรงด้าน Z ลบ และค่ารีพีทอะบิลิตี 0.95% ในแนวแรงด้านบวก

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์วัดแรงที่ได้มีค่ารีพีทอะบิลิตีที่ดีมาก แต่จะเห็นว่าค่ารีพีทอะบิลิตีในการวัดแรงในแนวแกน Z มีค่าสูงกว่าค่ารีพีทอะบิลิตีในการวัดแรงหรือโมเมนต์ด้านอื่นๆ โดยเฉพาะในทิศทางแกน Z บวก ทั้งนี้เนื่องมาจากเมตริกซ์ปรับเทียบค่าที่ได้มีอัตราการขยายสัญญาณในการวัดค่าแรงในแนวแกน Z สูง ทำให้มีผลของสัญญาณรบกวนหรือความไม่คงที่ของวงจรขยายเข้ามาเกี่ยวข้องกับผลของการวัดด้วย และนอกจากนี้จะพบว่าการออกแรงกระทำในแนวแกน Z นั้นอุปกรณ์ในการออกแรงกระทำเพื่อปรับเทียบค่ามีความคลาดเคลื่อนไม่คงที่อยู่บ้างทำให้แนวแรงไม่ตรงศูนย์กลางอย่างแท้จริง ทำให้ผลการวัดเกิดค่าคลาดเคลื่อนไม่คงที่ไปบ้างเล็กน้อย

ค่าไฮสเตรซิซิส (Hysteresis)

จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 7.21 ถึง 7.25 จะพบว่าผลการทดลองวัดค่าแรงและโมเมนต์ในแบบเพิ่ม โหลดและลด โหลดจะมีเส้นกราฟที่มีลักษณะไม่แตกต่างกันมากนัก ทำให้ไม่เห็นผลของ



ปรากฏการณ์ฮีสเตอร์ซิซอย่างเด่นชัด ทั้งนี้เนื่องมาจากอุปกรณ์วัดแรงนี้ถูกสร้างขึ้นมาจากวัสดุขึ้นเดียวกัคขึ้นรูป ทำให้ไม่มีผลของความผิดหรือแรงเสียดทานภายใน ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวจะทำให้เป็นผลดีในการวัดค่าแรงและ โมเมนต์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

การทดสอบผลการวัดแรงและโมเมนต์

ในการทดสอบในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาผลของแรงหรือ โมเมนต์ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งที่มีต่อการวัดค่าแรงและ โมเมนต์ในทิศทางอื่น ซึ่งในการทดลองเราจะทำการออกแรงในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นขั้นๆ เนื่องจากเราไม่สามารถออกแรงกระทำในลักษณะต่อเนื่องได้ โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 7.30 ถึง 7.45 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 7.30 ถึง 7.32 แสดงผลของการวัดค่าแรงในแนวแกน X ที่ตำแหน่งทูลเฟรม (เกิดโมเมนต์ในแนวแกน Y ที่เซนเซอร์เฟรม) จะพบว่าแรง F_x มีผลต่อการวัดค่าแรง F_y น้อยมาก แต่จะสังเกตเห็นว่าแรง F_x จะมีผลต่อค่าของแรง F_z โดยในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของแรง F_x ค่าของแรง F_z จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก (ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์) และจะมีค่าลดลงเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งลักษณะดังกล่าวอาจมีสาเหตุมาจากวิธีการอ่านค่าสัญญาณและความรวดเร็วในการวัดและส่งข้อมูลของอุปกรณ์แปลงสัญญาณที่ใช้ (ที่ความถี่ 4 กิโลเฮิรท์ซ) เนื่องจากในการทดลองเราทำการอ่านค่าข้อมูลจากจำนวน 15 จุด เพื่อมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า และต้องเสียเวลาส่วนหนึ่งในการเปลี่ยนช่องทางการวัดค่าสัญญาณที่มีถึง 8 สัญญาณ (ประมาณ .025 วินาที ต่อ ช่อง) ซึ่งทำให้ไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของระบบได้ทัน ส่วนผลของแรง F_x ที่มีต่อการวัดค่าโมเมนต์ M_z จะเห็นว่าเมื่อแรง F_x มากขึ้นทางบวกจะเกิดโมเมนต์ในทิศทางแกน Z ลบ และเมื่อแรง F_x มากขึ้นทางลบ จะเกิดโมเมนต์ในทิศทางแกน Z ลบ ซึ่งทั้งนี้มีส่วนมาจากการคัปปลิงของโครงสร้าง เนื่องจากแรง F_x จะทำให้เกิดโมเมนต์ในแนวแกน Y ซึ่งจะมีผลต่อค่าสัญญาณ W_1 , W_3 และ W_7 แต่เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจะมีค่าประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ (%FSO)

การตรวจสอบผลของแรงในแนวแกน Y พิจารณาจากรูปที่ 7.34 ถึง 7.37 จะพบว่าผลของแรง F_y จะมีลักษณะคล้ายกับผลของแรง F_x โดยในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงแรง F_y ค่าของแรง F_z จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน และจากการพิจารณาผลของแรง F_y ที่มีต่อโมเมนต์ M_z จะพบว่าแรง F_y มีผลต่อโมเมนต์ M_z น้อยมาก

การตรวจสอบผลของแรงในแนวแกน Z พิจารณาจากรูปที่ 7.38 ถึง 7.41 จากลักษณะของกราฟจะเห็นว่าแรง F_z จะไม่มีผลต่อการวัดค่าของแรงและ โมเมนต์ในทิศทางอื่นๆ เลย ซึ่งทั้งนี้มีส่วนมาจากการที่แรงในแนวแกน F_z จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะสเตรนเกจชุดที่ติดตั้งอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากเท่านั้น ทำให้ไม่สัมพันธ์กับการวัดค่าในทิศทางอื่นๆ

การตรวจสอบผลของโมเมนต์ในแนวแกน Z พิจารณาจากรูปที่ 7.42 ถึง 7.45 จะพบว่า โมเมนต์ในแนวแกน Z จะมีผลต่อการวัดค่าแรงในแนวแกน Z และแกน Y โดยที่โมเมนต์ ประมาณ 2 นิวตันเมตรจะเกิดความผิดพลาดในการวัดแรง F_z ประมาณ 5.5 เปอร์เซ็นต์ (% FSO) และความผิดพลาดในการวัดแรง F_y ที่ทุลเฟรมประมาณ 3-4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทั้งนี้มีส่วนมาจากการค้ำปลั่งของโครงสร้าง เนื่องจากโมเมนต์ M_z จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า w_6 และ w_8 ซึ่งจะไปมีผลต่อวัดค่าแรง F_z โดยตรงและขณะเดียวกันค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า w_8 ที่เกิดขึ้นจะไปมีผลต่อการวัดค่า โมเมนต์ M_x ซึ่งใช้ในการหาแรง F_y และทำให้เกิดค่าผิดพลาดดังกล่าวแล้ว



ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีว
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย