

รายการอ้างอิง

- [1] Hirata, H., et al. Performance evaluation for 100 w Proceedings of 8th International Stirling Engine Conference (1997): 19-28.
- [2] Takahashi, S., et al. Hydrogen internal combustion stirling engine. JSME International Journal, Series B Vol.46 No.4 (2003): 633-642.
- [3] Tlili, I., Timoumi, Y., and Nasrallah, s. Analysis and design consideration of mean temperature differential Stirling engine for solar application. Journal of Renewable Energy 33 (2008): 1911-1921.
- [4] Solar Navigator. Stirling engine[Online]. Available from:
http://www.solarnavigator.net/stirling_engine.htm [2009, May 15]
- [5] Animated Engines. Single cylinder Stirling engine[Online]. Available from:
<http://www.animatedengines.com/stirling.shtml> [2009, May 15]
- [6] Artin der massian. Stirling engine for low temperature solar-thermal-electric power generation, Doctoral dissertation, Department of Electrical engineering and computer sciences University of California, 2007.
- [7] Hirata, H. Mechanical loss reduction of a 100 w class stirling engine
Proceedings of 11th International Stirling Engine Conference (Nov 2004): 338-343.
- [8] Kagawa, N. . An experimental study of a 3-kw Stirling engine SEJ of Propulsion and Power 18 (June 2002): 92-100.
- [9] Otaka, T., et al. Experimental study on a Stirling cycle machine of 100w design capacity International Conference on Power Engineering (2007): 23-27.
Hangzhou, China, 2007.
- [10] Iwamoto, S., et al. Comparison of low and high temperature differential Stirling engine Proceedings of 10th International Stirling Engine Conference (2001): 29-38.
- [11]. Wikipedia. Stirling cycle[Online]. Available from:
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stirling_Cycle.png [2009, November 10]

- [12] Heywood, D. Investigation of Stirling-type Heat-pump and Refrigerator Systems Using Air as the Refrigerant, Doctoral dissertation, Department of Mechanical engineering University of Canterbury, 2004.
- [13] Hargreaves, C.M. THE PHILIPS STIRLING ENGINE. New York:Elsevier Science Publishers, 1991.
- [14] ชนะ ศิริคำ และ อังคีร์ ศรีภคการ, การออกแบบและสมรรถนะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงแบบผลต่างอุณหภูมิปานกลางสำหรับการใช้งานร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต,ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [15] Martini,R. STIRLING ENGINE DESIGN MANUAL,. Washington: Joint Center for Graduate Study, 1978. (Mimeographed),
- [16]. Thieme,L.G. High-Power Baseline and Motoring Test Results for the GPU-3 Stirling Engine, 1981. Washington: Joint Center for Graduate Study, 1981. (Mimeographed),
- [17] Parlak, N., et al. Thermodynamic analysis of a gamma type Stirling engine in non-Ideal adiabatic conditions. Journal of Renewable Energy 34 (2009): 266-273.
- [18] Berchowiz, D.M. Development and Performace of a 3 kW Air Charged Free-Piston Stirling Engine with Linear Alternator 22nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference 22 (1987): 1835-1840.
- [19] Scollo, L., et al. Design and construction of a Stirling engine prototype. International Journal of Hydrogen Energy 33 (2008): 3506-3510.
- [20] Tanaka, M., et al. Flow ns Heat Transfer Characteristics of the Stirling Engine Regenerator. JSME International Journal 33 (1990): 283-289.
- [21] Hirata, H., et al. Test Results Of Applicative 100 W Stirling Engine. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference 2 (1996): 1259-1264.
- [22] Prieto, J.L., et al. Preliminary Design Of The Kinematic Stirling Engine Using Dynamic Similarity And Quasi-Static Simulation. Proceedings of Institution of Mechanical Engineers 211 (1997): 229-238.

- [23] Prieto, J.L., et al. A new equation representing the performance of kinematic Stirling engine. Proceedings of Institution of Mechanical Engineers 214 (2000): 449-464.
- [24] Urieli, I. Stirling Cycle Engine Analysis,. Bristol: Adam Hilger Ltd, 1984. (Mimeographed),
- [25] Parlak, N., et al. Effectiveness Enhancement of a Thermal Regenerator in An Oscillating flow. Applied Thermal Engineering 18 (1998): 653-660.
- [26] Eid, E. Performance of a beta-configuration heat engine having a regenerative displacer. Journal of Renewable Energy 34 (2009): 2404-2413.
- [27] Sripakagorn, P. Frequency and Phase Response of a Reasonantly-Coupled Alpha Stirling Cooler, Master's Thesis Mechanical engineering Oregon State University, 1997.
- [28]. Fraley, S., et al. Design of experiments via taguchi methods: orthogonal arrays[Online]. Available from: http://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/Design_of_experiments_via_taguchi_methods:_orthogonal_arrays#column-one [2010, June 21]
- [29]. Saint-Gobain. Rulon Meterial Piston Ring[Online]. Available from: <http://www.seals.saint-gobain.com/detailimg.aspx?id=236526> [2010, May19]

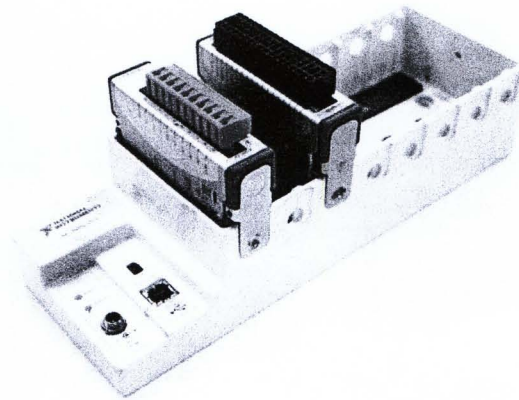
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

อุปกรณ์การวัด

ก1. การวัดอุณหภูมิและความเร็วรอบ

การเก็บผลของอุณหภูมิสามารถตรวจวัดและเก็บบันทึกค่าโดยการเชื่อมต่อสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจาก Thermocouple ชนิด K เข้าสู่อุปกรณ์ตรวจวัดอัตโนมัติ (Data Acquisition, DAQ) ได้โดยตรง ซึ่งได้ใช้อุปกรณ์รุ่น NI 9205 เชื่อมต่อกับแท่นรวมอุปกรณ์รุ่น NI cDAQ-9172 จาก National Instruments ดังแสดงในรูปที่ ก-1 เพื่อการวัดผลและบันทึกค่าอุณหภูมิเข้าสู่คอมพิวเตอร์



รูปที่ ก-1 อุปกรณ์ตรวจวัดอัตโนมัติ (Data Acquisition, DAQ)

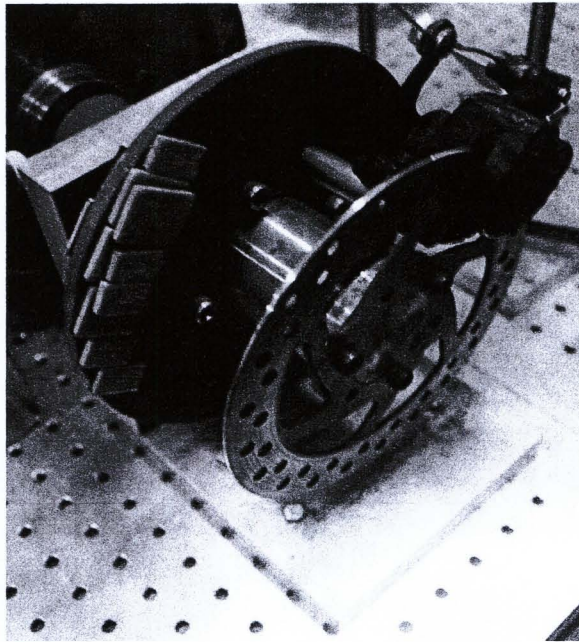
ส่วนการวัดความเร็วรอบเครื่องยนตใ้ Inductive sensor ยี่ห้อ Efecter 100 รุ่น IG5841 ดังแสดงในรูปที่ ก-2 เป็นตัวส่งสัญญาณรูปคลื่นเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจวัดอัตโนมัติ การแปลงผลออกมาเป็นความเร็วรอบของเครื่องยนตสามารถทำได้ด้วยรหัสโปรแกรม LabVIEW ซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อการเชื่อมต่อและบันทึกสัญญาณจากระบบตรวจวัดอัตโนมัติที่ได้ติดตั้งขึ้น



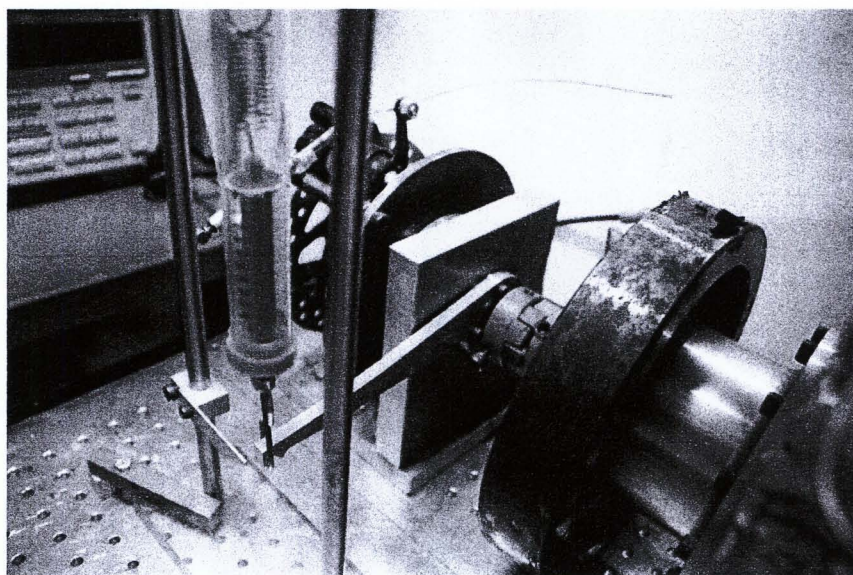
รูปที่ ก-2 อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วรอบเครื่องยนต ยี่ห้อ Efecter 100 รุ่น IG58

ก2. อุปกรณ์การวัดแรงบิดเครื่องยนต์

แรงบิดของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบใดๆ สามารถวัดผลได้จากการสร้างภาระให้กับจานเบรกด้วยการปรับระดับความตึงของสายเบรกดังแสดงในรูปที่ ก-3 เรือนเสื้อของจานเบรกสามารถเคลื่อนตัวในทิศทางการหมุนด้วยการติดตั้งเข้ากับลูกปืนตลับ และมีการติดตั้งแขนแรงเข้าที่เรือนเสื้อของจานเบรก แรงบิดที่ได้จากเครื่องยนต์วัดผลได้ด้วยการนำตาชั่งน้ำหนักวัดน้ำหนักที่กระทำกับปลายแขนแรง ดังแสดงในรูปที่ ก-4



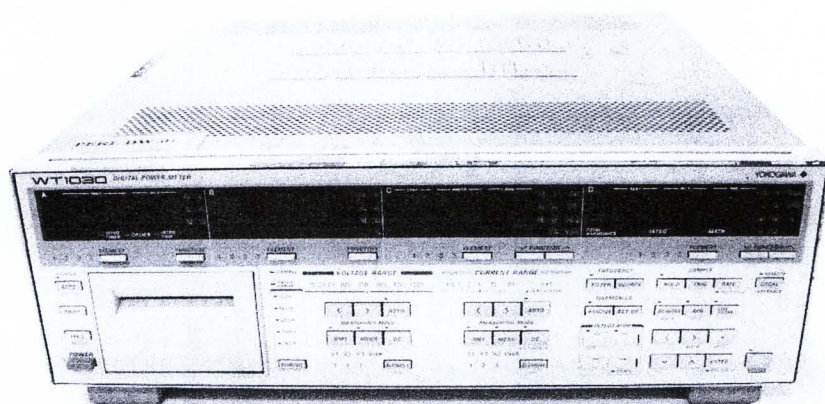
รูปที่ ก-3 จานเบรก



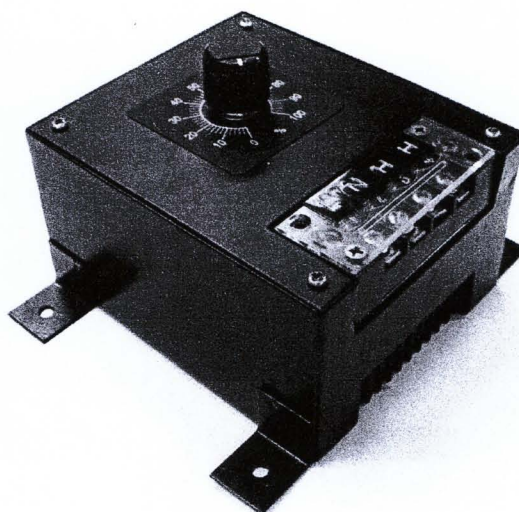
รูปที่ ก-4 การติดตั้งเครื่องมือวัดแรงบิด

ก3. อุปกรณ์วัดกำลังไฟฟ้าและควบคุมกำลังไฟฟ้า

อุปกรณ์การวัดอีกชิ้นหนึ่งที่มีส่วนสำคัญในการวัดผลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ คือ อุปกรณ์วัดกำลังไฟฟ้าแบบดิจิทัล ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น WT1030 ดังแสดงในรูปที่ ก-5 อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถวัดกำลังไฟฟ้าตามความต้องการพลังงานของชุดลดความร้อน กำลังไฟฟ้าสามารถควบคุมได้โดย SCR หรือที่เรียกว่า Triac circuit เพื่อให้ได้ความร้อนคงที่เมื่อทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ ก-6



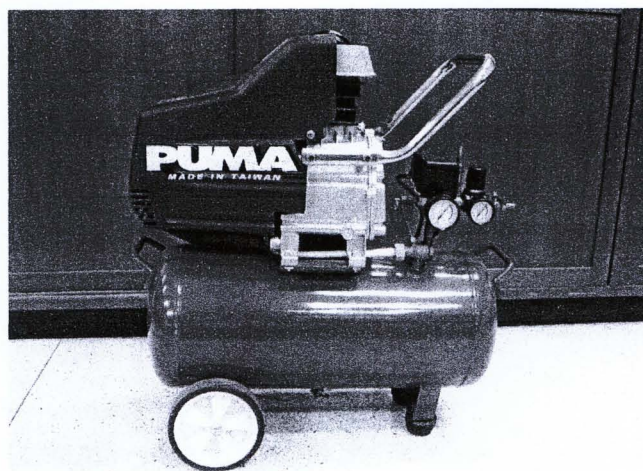
รูปที่ ก-5 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้ายี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น WT1030



รูปที่ ก-6 อุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้า

ก4. ถังลมและอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน

การจ่ายสารทำงานให้กับระบบเพื่อให้สามารถทำงานอยู่ในสภาวะความดันต่างๆ ตามที่ต้องการทดสอบ สำหรับการใช้อากาศเป็นสารทำงานจะใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (Pressure regulator) เพื่อให้การจ่ายแรงดันสม่ำเสมอตลอดช่วงการทดสอบโดยถูกติดตั้งมาพร้อมกับถังลมยี่ห้อ PUMA รุ่น XM-2525 ขนาดถังกักเก็บความดัน 25 ลิตร ความดันสูงสุดของถังลมที่ระดับ 8 บาร์ อัตราการไหลอยู่ที่ระดับ 250 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ ก-7



รูปที่ ก-7 ถังลมพร้อมกับอุปกรณ์ควบคุมแรงดันยี่ห้อ PUMA

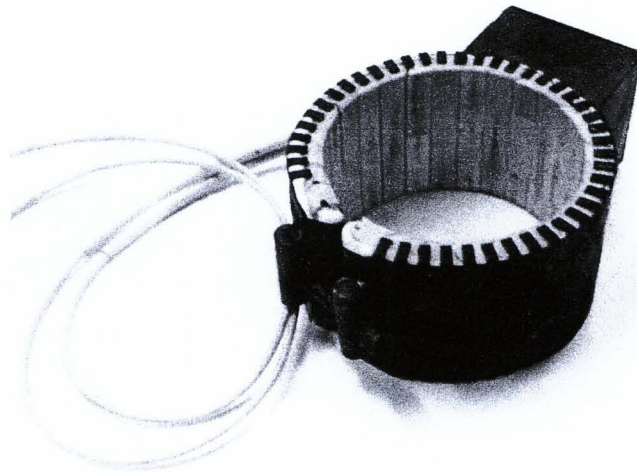
การใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงานจะใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (Pressure regulator) ยี่ห้อ MESSER ซึ่งสามารถปรับระดับความดันได้สูงสุด 10 bar สำหรับใช้ลดระดับความดันภายในถังฮีเลียมก่อนนำมาใช้ในการทดสอบ แสดงดังรูปที่ ก-8



รูปที่ ก-8 ถังฮีเลียมกับอุปกรณ์ควบคุมแรงดันยี่ห้อ MESSER

ก5. ขดลวดไฟฟ้า

ในการทดสอบ พลังงานความร้อนได้มาจากขดลวดไฟฟ้า ขนาดกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 4000 W รูปแบบเป็นแบบรัดท่อ ดังแสดงในรูปที่ ก-8



รูปที่ ก-9 ขดลวดไฟฟ้าแบบรัดท่อขนาดกำลังไฟฟ้า 4000 W

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบเครื่องยนต์

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 1 bar (ก่อนเลือก
ลักษณะจำเพาะที่เหมาะสมที่สุด)

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด (N.m)	กำลังขาออก (W)
1	570	612	0.60	0.09	5.77
2	510	478	1.00	0.15	7.51
3	484	400	1.40	0.21	8.80
4	472	339	1.50	0.23	7.99
5	452	288	1.55	0.23	7.01
6	430	212	1.70	0.26	5.66
7	411	151	1.70	0.26	4.03

ตารางที่ ข-2 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 3 bar (ก่อนเลือก
ลักษณะจำเพาะที่เหมาะสมที่สุด)

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด(N.m)	กำลังขาออก (W)
1	960	988	0.70	0.11	10.86
2	868	863	1.90	0.29	25.76
3	810	790	2.70	0.41	33.51
4	780	746	3.10	0.47	36.33
5	760	701	3.40	0.51	37.44
6	752	646	3.90	0.59	39.57

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด(N.m)	กำลังขาออก (W)
7	730	603	4.30	0.65	40.73
8	680	562	4.60	0.69	40.61
9	640	493	4.90	0.74	37.95
10	600	451	5.30	0.80	37.55
11	575	403	5.30	0.80	33.55
12	560	356	5.50	0.83	30.76
13	530	300	5.70	0.86	26.86
14	500	249	5.70	0.86	22.29
15	465	206	5.50	0.83	17.80
16	428	151	5.20	0.78	12.33

ตารางที่ ข-3 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 5 bar (ก่อนเลือก
ลักษณะจำเพาะให้เหมาะสมที่สุด)

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด (N.m)	กำลังขาออก (W)
1	1270	922	0.70	0.11	10.14
2	1270	877	1.80	0.27	24.80
3	1265	853	2.70	0.41	36.18
4	1225	805	3.50	0.53	44.26
5	1177	762	4.55	0.68	54.46

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด (N.m)	กำลังขาออก (W)
6	1126	706	5.80	0.87	64.32
7	1075	672	6.90	1.04	72.83
8	1023	599	8.00	1.20	75.27
9	995	565	8.65	1.30	76.77
10	926	508	9.60	1.44	76.60
11	883	462	10.00	1.50	72.57
12	825	404	11.00	1.65	69.81
13	756	336	11.80	1.77	62.28
14	722	260	12.00	1.80	49.01
15	691	210	12.20	1.83	40.24

ตารางที่ ข-4 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 7 bar (ก่อนเลือก
ลักษณะจำเพาะให้เหมาะสมที่สุด)

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด (N.m)	กำลังขาออก (W)
1	1260	646	0.30	0.05	3.04
2	1250	606	2.90	0.44	27.61
3	1240	526	8.50	1.28	70.23
4	1180	465	12.00	1.80	87.65
5	1140	417	14.50	2.18	94.98

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด (N.m)	กำลังขาออก (W)
6	1020	360	16.87	2.53	95.40
7	965	325	18.10	2.72	92.40
8	860	235	19.62	2.94	72.42

ตารางที่ ข-5 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 3 bar (หลังเลือก
ลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุด)

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด (N.m)	กำลังขาออก (W)
1	1218	998	1.47	0.22	23.07
2	1211	941	2.94	0.44	43.51
3	1093	893	4.12	0.61	57.81
4	1070	835	4.90	0.73	64.36
5	943	797	5.39	0.80	67.57
6	897	743	5.78	0.86	67.57
7	812	705	6.08	0.91	67.38
8	798	624	6.86	1.03	67.33
9	734	573	7.45	1.11	67.13
10	702	524	7.84	1.17	64.62

ตารางที่ ข-6 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 5 bar (หลังเลือก
ลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุด)

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด (N.m)	กำลังขาออก (W)
1	1239	934	1.76	0.26	25.91
2	1239	876	3.33	0.5	45.91
3	1154	832	3.82	0.57	50.02
4	1117	798	4.21	0.63	52.89
5	1109	753	5.29	0.79	62.68
6	1109	723	6.57	0.98	74.67
7	1109	694	7.06	1.05	77.02
8	1067	642	7.65	1.14	77.19
9	1067	621	8.14	1.22	79.45
10	984	607	8.43	1.26	80.47
11	987	584	8.92	1.33	81.92
12	921	530	9.41	1.41	78.43
13	853	476	9.81	1.47	73.37

ตารางที่ ข-7 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 7 bar (หลังเลือก
ลักษณะจำเพาะของ regenerator ให้เหมาะสมที่สุด)

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด (N.m)	กำลังขาออก (W)
1	1573	920	1.17	0.17	17.01
2	1563	898	2.06	0.30	29.07
3	1563	850	3.13	0.47	41.93
4	1523	824	3.92	0.58	50.81
5	1403	796	4.9	0.73	61.35
6	1372	753	7.06	1.05	83.57
7	1372	702	8.63	1.29	95.23
8	1350	660	10.79	1.61	111.91
9	1270	622	12.75	1.91	124.65
10	1216	594	13.73	2.06	128.19
11	1184	544	14.51	2.17	124.11
12	1065	500	14.91	2.23	117.15

ตารางที่ ข-8 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 7 bar หลังจากใช้แหวน
ลูกสูบกำลังนานกว่า 40 ชม

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด (N.m)	กำลังขาออก (W)
1	1576	824	1.27	0.19	12.70

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด (N.m)	กำลังขาออก (W)
2	1538	806	1.66	0.25	22.36
3	1508	781	2.25	0.33	36.11
4	1423	726	2.9	0.44	49.24
5	1387	678	4.31	0.64	75.25
6	1306	635	5.19	0.77	88.1
7	1254	600	6.08	0.91	99.89
8	1132	552	6.47	0.97	98.7
9	1076	483	6.86	1.03	92.32
10	989	450	7.06	1.05	88.79

ตารางที่ ข-9 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 3 bar เมื่อใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงาน

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด (N.m)	กำลังขาออก (W)
1	1289	983	0.58	0.17	18.18
2	1195	946	0.98	0.29	29.16
3	1102	834	1.66	0.5	43.71
4	1002	751	2.25	0.67	53.25
5	942	700	2.55	0.76	56.11
6	937	665	2.74	0.82	57.4

ตารางที่ ข-10 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 5 bar เมื่อใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงาน

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด (N.m)	กำลังขาออก (W)
1	1565	946	0.49	0.14	14.58
2	1499	890	1.07	0.32	30.18
3	1508	837	1.76	0.52	46.45
4	1317	780	2.45	0.73	60.12
5	1294	720	2.94	0.88	66.59
6	1254	691	3.43	1.03	74.56
7	1157	663	3.62	1.08	75.63
8	1047	596	4.02	1.20	75.33

ตารางที่ ข-11 ผลการทดสอบที่ระดับอุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C ความดัน 7 bar เมื่อใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงาน

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด (N.m)	กำลังขาออก (W)
1	1534	946	1.07	0.32	26.89
2	1461	890	1.66	0.5	40.41
3	1430	837	2.45	0.73	54.72
4	1263	780	2.94	0.88	61.04
5	1263	720	3.72	1.11	74.39

ทดสอบครั้งที่	กำลังขาเข้า (W)	ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนัก (N)	แรงบิด (N.m)	กำลังขาออก (W)
6	1103	691	4.02	1.20	76.98
7	973	663	4.51	1.35	82.68

ตารางที่ ข-12 ค่า β ที่ได้จากการเลือกลักษณะจำเพาะที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการของ Taguchi

C/F			control factor setting									
ขนาด ตาข่าย	ปริมาตร ตาย	ค่าความ พรุน	Beta ($\times 10^{-4}$)	1,L1	1,L2	1,L3	2,L1	2,L2	2,L3	3,L1	3,L2	3,L3
40	17	0.7	3.59	3.59	0	0	3.59	0	0	3.59	0	0
40	39	0.8	6.71	6.71	0	0	0	6.71	0	0	6.71	0
40	55	0.9	5.8	5.8	0	0	0	0	5.8	0	0	5.8
80	17	0.8	7.09	0	7.09	0	7.09	0	0	0	7.09	0
80	39	0.9	2.61	0	2.61	0	0	2.61	0	0	0	2.61
80	55	0.7	14.4	0	14.4	0	0	0	14.4	14.4	0	0
120	17	0.9	4.62	0	0	4.62	4.62	0	0	0	0	4.62
120	39	0.7	10.5	0	0	10.5	0	10.5	0	10.5	0	0
120	55	0.8	14.4	0	0	14.4	0	0	14.4	0	14.4	0
ค่าเฉลี่ย				5.38	8	9.8	5.11	6.61	11.59	9.52	9.42	4.36

ตารางที่ ข.13 ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง simple เมื่อใช้อากาศเป็นสารทำงานที่ความดัน 7 bar อุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C

	ความเร็วรอบ 600 rpm	ความเร็วรอบ 1800rpm
Heat transferred to the cooler (W) [adiabatic]	-462.76	-1411.04
Net heat transferred to the regenerator (W) [adiabatic]	0.01	0.04
Heat transferred to the heater (W) [adiabatic]	825.6	2460.24
Total power output (W) [adiabatic]	363.25	1050.49
Thermal efficiency (%) [adiabatic]	44	42.7
Average Reynolds number:	108.3	325.5
Maximum Reynolds number:	203.5	691.5
Stanton number(Average Re)	0.099	0.064

	ความเร็วรอบ 600 rpm	ความเร็วรอบ 1800rpm
Number of transfer units:	22.5	14.5
Regenerator effectiveness :	0.958	0.936
Regenerator net enthalpy loss(W)	112.3	497.7
Pressure drop available work loss (W)	22.8	385.2
Actual power from simple analysis (W)	340.4	665.3
Actual heat power in from simple analysis (W)	1281.5	3301.6
Actual efficiency from simple analysis(%)	26.6	20.1

ตารางที่ 14 ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง simple เมื่อใช้ฮีเลียมเป็นสารทำงานที่ความดัน 7 bar อุณหภูมิผิวฮีตเตอร์ 500 °C

	ความเร็วรอบ 600 rpm	ความเร็วรอบ 1800rpm
Heat transferred to the cooler (W) [adiabatic]	-545.55	-1661.1
Net heat transferred to the regenerator (W) [adiabatic]	0.03	0.08
Heat transferred to the heater (W) [adiabatic]	879.51	2621.84
Total power output (W) [adiabatic]	334.61	962.74
Thermal efficiency (%) [adiabatic]	44	36.7
Average Reynolds number:	14	42.1
Maximum Reynolds number:	29.1	87.2
Stanton number(Average Re)	0.225	0.145
Number of transfer units:	51.1	32.9
Regenerator effectiveness :	0.981	0.97
Regenerator net enthalpy loss (W)	36.1	162.4

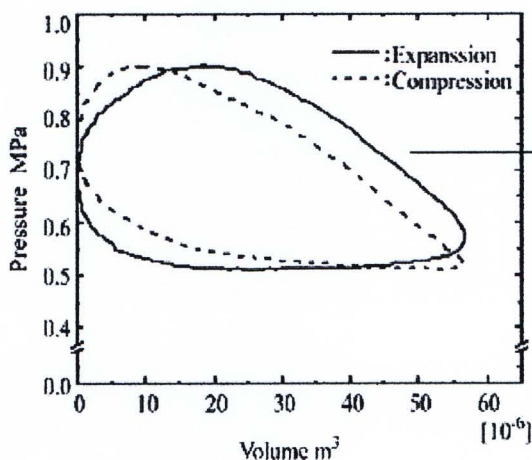
	ความเร็วรอบ 600 rpm	ความเร็วรอบ 1800rpm
Pressure drop available work loss (W)	12.1	149.6
Actual power from simple analysis (W)	322.5	813.2
Actual heat power in from simple analysis (W)	1259.2	3127.8
Actual efficiency from simple analysis(%)	25.6	26

ภาคผนวก ค

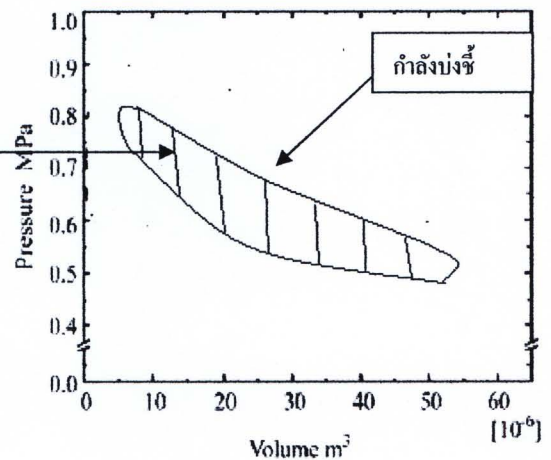
การประเมินความเป็นไปได้ในการวัดค่ากำลังบ่งชี้

ค.1 การประเมินความเป็นไปได้ในการวัดค่ากำลังบ่งชี้

การวัดค่ากำลังบ่งชี้สามารถทำได้โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงความดันและปริมาตรภายใน expansion space และ compression space ในระหว่างองศาการหมุนของเพลลา เพื่อที่จะนำมาใช้คำนวณค่า expansion power และ compression power จากพื้นที่ใต้กราฟ P-V แสดงดังรูปที่ ค-1 ก. จากนั้นนำ expansion power และ compression power ที่ได้มาหักลบกัน เพื่อให้ได้ค่ากำลังบ่งชี้แสดงดังรูปที่ ค-1 ข.



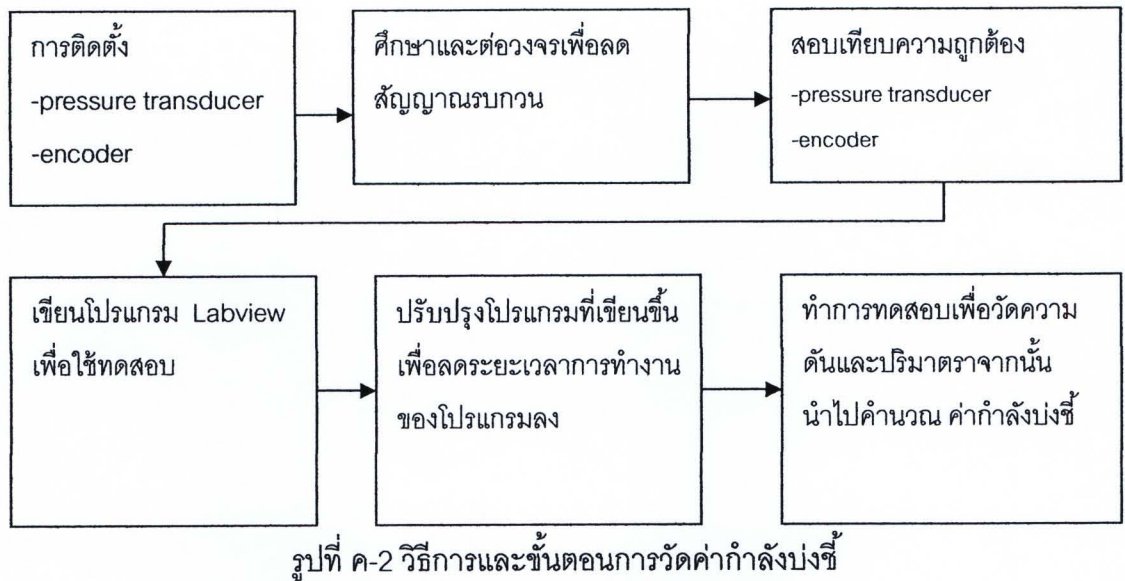
ก แผนภาพ P-V ของ expansion power และ compression power



ข แผนภาพ P-V ของกำลังบ่งชี้

รูปที่ ค-1 วิธีการคำนวณค่ากำลังบ่งชี้

การวัดค่ากำลังบ่งชี้ข้างต้นสามารถเขียนเป็นแผนภาพรวมของวิธีการและขั้นตอนในการวัดค่ากำลังชี้ ดังแต่การติดตั้งอุปกรณ์จนถึงการทดสอบได้เป็น 6 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ ค-2 คือ ขั้นตอนที่ 1 การติดตั้ง pressure transducer ภายใน expansion space และ compression space และวัดปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงของ expansion space และ compression space ขั้นตอนที่ 2 การต่อวงจรเพื่อลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นของ pressure transducer และ encoder ขั้นตอนที่ 3 การสอบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือทั้งในส่วน of pressure transducer และ encoder ขั้นตอนที่ 4 การเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการวัด ขั้นตอนที่ 5 การปรับปรุงโปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อลดระยะเวลาในการทำงานของโปรแกรมลง ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบเครื่องยนต์เพื่อวัดความดันและปริมาตรไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังบ่งชี้ จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า วิธีการวัดค่ากำลังบ่งชี้มีความซับซ้อนสูง ดังนั้นการประเมินความเป็นไปได้ในการวัดค่ากำลังบ่งชี้ก่อนการดำเนินงานจึงเป็นสิ่งจำเป็น



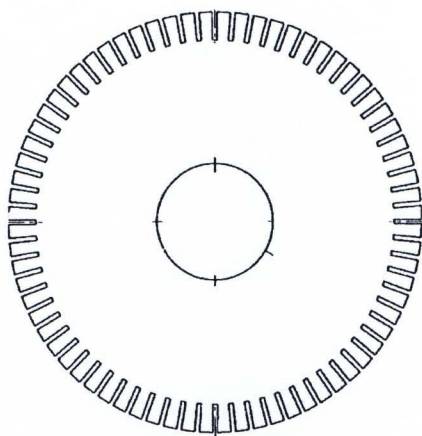
ค.2 ขั้นตอนในการวัดค่ากำลังบ่งชี้

กระบวนการในการวัดค่ากำลังบ่งชี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ขั้นตอน ซึ่งแต่ละขั้นตอนอธิบายโดยละเอียดได้ดังนี้

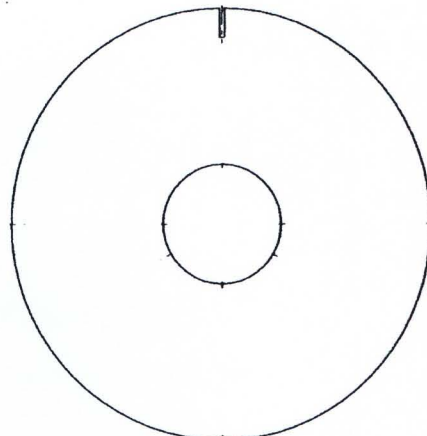
ขั้นตอนที่ 1 การติดตั้ง pressure transducer และ encoder

การติดตั้ง pressure transducer จะต้องติดตั้งไว้ด้วยกัน 2 ตำแหน่งด้วยกันคือภายใน expansion space และ compression space เพื่อวัดความดันภายใน expansion space และ compression space ซึ่งการเก็บค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงไปจะต้องสอดคล้องกันกับการเก็บค่าปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป

การติดตั้ง encoder สามารถทำได้โดยใช้แนวคิดของ David Heywood [17] ซึ่งใช้วงล้อ encoder 2 ตัว ติดตั้งอยู่ที่เพลลาของเครื่องยนต์ดังรูปที่ ค-3 ตัวที่หนึ่งจะเป็นวงล้อ encoder ที่มีซี่ฟันทุกๆ 5 องศาสำหรับเก็บค่าความดันและปริมาตร ค่าปริมาตรจะได้จากความสัมพันธ์ขององศาที่เปลี่ยนแปลงไปของกลไก scotch yoke กับการเคลื่อนที่ขึ้นลงของ ลูกสูบ displacer และ ลูกสูบกำลัง ตัวที่สองจะเป็นวงล้อที่มีซี่ฟันไว้สำหรับตั้งค่าให้เป็น 0 องศาและให้เก็บค่าความเร็วรอบ



ก. วงล้อ encoder สำหรับเก็บค่า
ความดันและปริมาตร



ข. วงล้อ encoder สำหรับตั้งค่าให้
เป็น 0 องศาและใช้เก็บค่าความเร็วรอบ

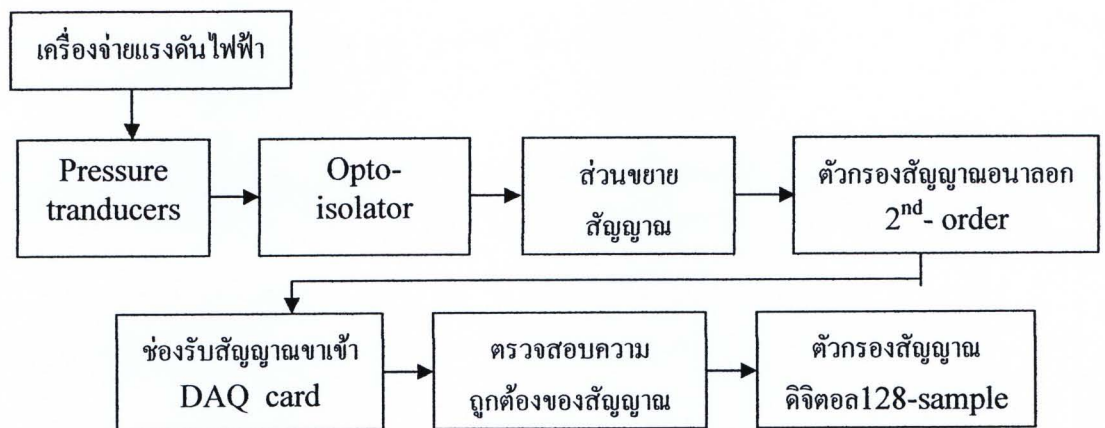
รูปที่ ค-3 วงล้อ encoder

ขั้นตอนที่ 2 การต่อวงจรเพื่อลดสัญญาณรบกวน

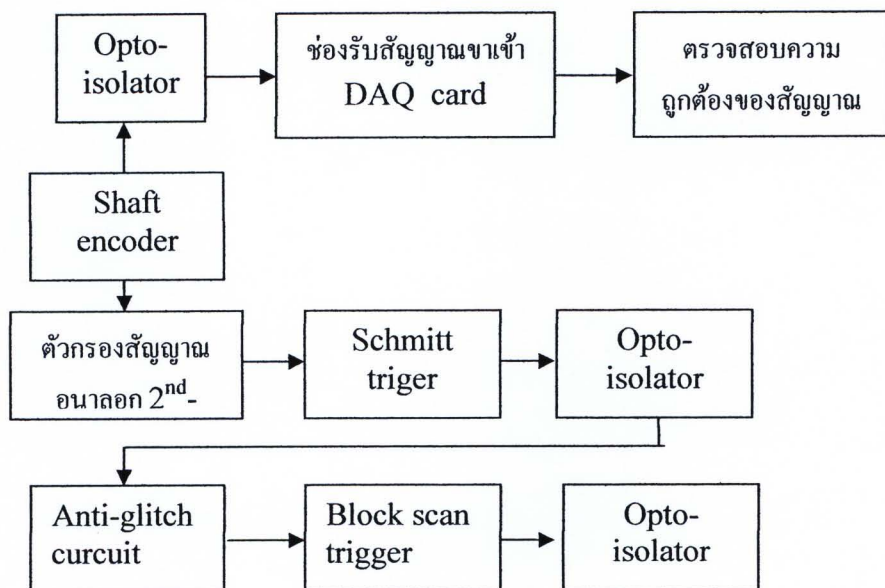
การวัดค่ากำลังบ่งชี้จำเป็นต้องใช้สัญญาณ pressure transducer และ shaft encoder ที่มีความแม่นยำสูง เนื่องจากค่าความดันและปริมาตรจะถูกใช้ในการคำนวณค่า expansion power และ compression power ความผิดพลาดของการวัดที่เกิดจากสัญญาณรบกวนของ pressure transducer และ shaft encoder อาจเกิดขึ้นโดย สัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในห้องที่ทำการทดสอบ ซึ่งสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีผลทำให้ค่าความดันที่วัดได้และการจับสัญญาณ pulse ของ encoder มีความผิดพลาดเกิดขึ้น นอกจากสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วยังสัญญาณรบกวนอื่นๆอีกมากมาย ดังนั้นการต่อวงจรเพื่อลดสัญญาณรบกวนจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้สามารถวัดค่าความดันและปริมาตรได้อย่างถูกต้องที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

การต่อวงจรลดสัญญาณรบกวนของ pressure transducer และ shaft encoder ตามแนวคิด David Heywood [17] แสดงดังรูปที่ ค-4 และ ค-5 ตามลำดับ การต่อวงจรลดสัญญาณรบกวนของ pressure transducer จะประกอบไปด้วย การต่อ opto-isolator เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนระหว่างวงจรไฟฟ้า จากนั้นตัวขยายสัญญาณจะขยายสัญญาณของ pressure transducer สัญญาณที่ถูกขยายแล้วจะผ่านตัวกรองสัญญาณอนาล็อก 2nd เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงและผ่านไปยังตัวกรองสัญญาณดิจิทัล 128-sample

เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำ การต่อวงจรลดสัญญาณรบกวนของ shaft encoder จะประกอบไปด้วย การต่อ opto-isolator เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนระหว่าง วงจรไฟฟ้า จากนั้นสัญญาณที่ได้จะผ่านไปยังตัวกรองสัญญาณอนาล็อก 1st-order เพื่อลด สัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงและใช้ Smitt trigger ทำให้สัญญาณอยู่ใน รูปเหลี่ยม สัญญาณรูปเหลี่ยมที่ได้จะผ่านไปยังวงจร anti-glitch เพื่อตัดสัญญาณที่มีความยาว คลื่นต่ำกว่าที่ควรจะเป็นตามความเร็วรอบนั้นๆ และใช้ block scan trigger ในการสร้างสัญญาณ pulse 9 สัญญาณจากสัญญาณรูปเหลี่ยม



รูปที่ ค-4 แผนภาพวงจรลดสัญญาณรบกวนของ pressure transducer



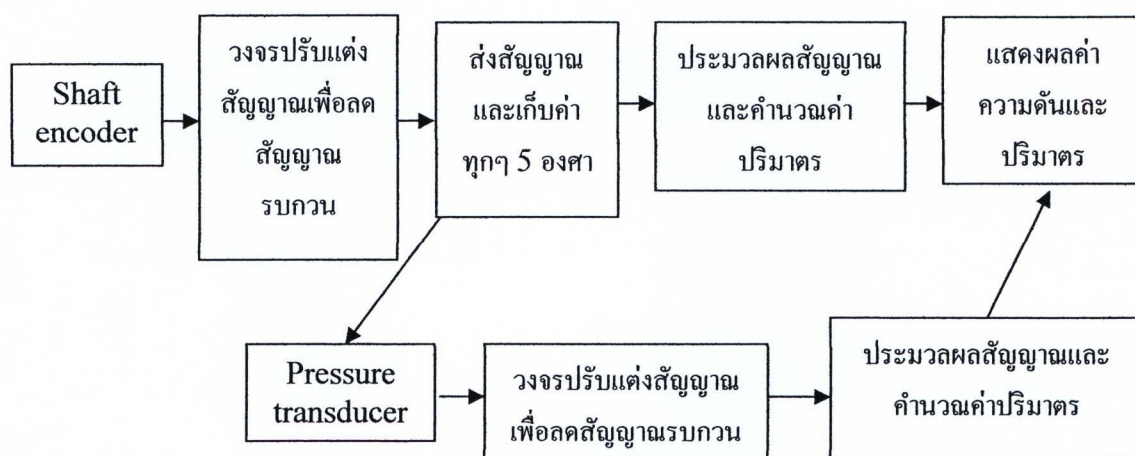
รูปที่ ค-5 แผนภาพวงจรลดสัญญาณรบกวนของ shaft encoder

ขั้นตอนที่ 3 การสอบเทียบความถูกต้อง

การสอบเทียบความถูกต้องของ pressure transducer และ shaft encoder ตามแนวคิดของ david haywood [17] จะใช้เครื่องวัดแรงดันที่มีความแม่นยำสูงในการสอบเทียบความถูกต้องของ pressure transducer และใช้ hall sensor ในการสอบเทียบความถูกต้องขององศาที่เปลี่ยนแปลงไปกับระดับความสูงของลูกสูบที่เปลี่ยนแปลงไป ผลการสอบเทียบที่ได้จะนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อให้อ่านค่าความดันและปริมาตรได้อย่างถูกต้อง

ขั้นตอนที่ 4 และ 5 การเขียนและปรับปรุงโปรแกรม

การเขียนโปรแกรมสำหรับใช้วัดค่ากำลังบ่งชี้จะเริ่มจากศึกษาวิธีการเขียนโปรแกรมด้วยโปรแกรม Lab view และศึกษาความสัมพันธ์ของการวัดความดันและปริมาตร เพื่อนำมาใช้ในการเขียนโปรแกรมสำหรับการวัดค่ากำลังบ่งชี้ ซึ่งความสัมพันธ์ของการวัดความดันและปริมาตรภายในโปรแกรม แสดงดังรูปที่ ค-6 จากรูปแสดงให้เห็นว่า encoder จะส่งสัญญาณรูปเหลี่ยมทุกๆ 5 องศา มายังวงจรปรับแต่งสัญญาณ จากนั้นสัญญาณรูปเหลี่ยมที่ผ่านการปรับแต่งสัญญาณแล้วจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 สัญญาณจะถูกส่งไปยังหน่วยประมวลผลเพื่อคำนวณปริมาตร ส่วนที่ 2 สัญญาณจะถูกส่งไปยังส่วนที่ใช้ในการสั่งให้เก็บค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก pressure transducer เพื่อที่จะนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณเป็นความดันในส่วนประมวลผล ค่าความดันและปริมาตรที่ได้จะถูกส่งไปยังหน่วยแสดงผล เพื่อแสดงเป็นกราฟและเก็บข้อมูลค่าความดันและปริมาตรในรูปแบบของไฟล์ excel



รูปที่ ค-6 แผนภาพของโปรแกรม

การศึกษากการเขียนโปรแกรมข้างต้นแสดงให้เห็นว่า โปรแกรมที่เขียนขึ้นจำเป็นต้องคำนึงถึงความเร็วในการทำงานต่อ 1 รอบของโปรแกรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากผลของการเก็บค่า

ความดันและปริมาตรทุกๆ 5 องศา ทำให้ความถี่ของการเก็บค่าเพิ่มขึ้นจากการวัดความเร็วรอบเพียงอย่างเดียวถึง 72 เท่า เช่น ที่ความเร็วรอบ 1000 rpm คิดเป็นค่าความถี่ได้เท่ากับ 16.67 Hz ระยะเวลาการทำงานของโปรแกรมต่อ 1 รอบ เพื่อเก็บค่าความถี่ข้างต้น จะต้องมีความเร็วมากกว่าหรือเท่ากับคาบของความถี่นั้นคือ 0.059 s ถ้ามีการเก็บค่าความดันและปริมาตรด้วย โปรแกรมที่เขียนขึ้นจะต้องมีความเร็วมากกว่าหรือเท่ากับ 0.0008194 s ถึงจะสามารถเก็บค่าความดันและปริมาตรได้ทุกๆ 5 องศา ดังนั้นหลังจากการเขียนโปรแกรมเบื้องต้นเสร็จและตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานของโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว จะต้องมีการปรับปรุงโปรแกรมอีกครั้งหนึ่งเพื่อลดระยะเวลาในการทำงานของโปรแกรมต่อ 1 รอบ เพื่อให้สามารถเก็บค่าความดันและปริมาตรได้อย่างถูกต้อง

ขั้นตอนที่ 6 การคำนวณค่ากำลังบ่งชี้

ค่าความความดันและปริมาตรที่ได้จากการวัดข้างต้นจะนำไปใช้ในการคำนวณค่า expansion power และ compression power ตามแนวคิดของ david haywood [17] จากสมการ

$$L_e, L_c = \pi \left(\frac{n_s}{60}\right) \sum_{N=1}^{Ns} (p_N + p_{N+1})(V_N - V_{N+1}) \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ n_s คือ ความเร็วรอบ และ Ns คือ จำนวนข้อมูลค่าความดันและปริมาตรที่เก็บค่าใน 1 รอบ การหมุนของเครื่องยนต์ ($Ns = 72$) ค่า expansion power และ compression power ที่ได้จากสมการข้างต้นจะถูกหักลบกันเป็นค่ากำลังบ่งชี้

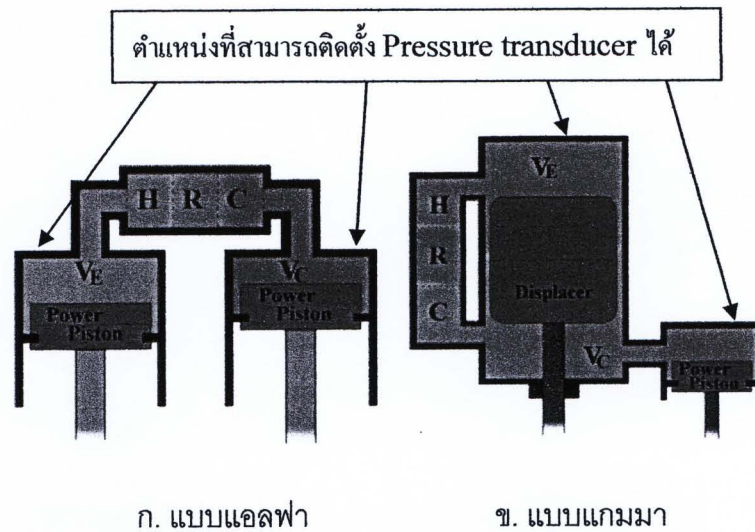
ค.2 ปัญหาที่พบในการประเมินความเป็นไปได้ในการวัดค่ากำลังบ่งชี้

ปัญหาที่พบในการประเมินความเป็นไปได้ในการวัดค่ากำลังบ่งชี้ มีด้วยกัน 3 ส่วน คือ ปัญหาจากการไม่สามารถติดตั้ง pressure transducer ได้, ปัญหาจากความซับซ้อนของการต่อวงจรเพื่อลดสัญญาณรบกวนและปัญหาจากระยะเวลาทำงานต่อ 1 รอบของโปรแกรม ซึ่งจะอธิบายสาเหตุของปัญหาดังกล่าวข้างต้นโดยละเอียดต่อไป

ค.2.1 ปัญหาจากการไม่สามารถติดตั้ง pressure transducer ได้

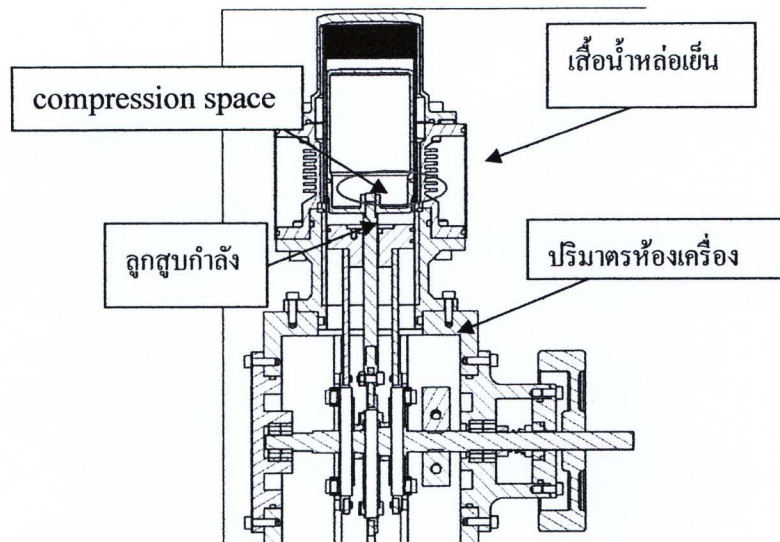
ปัญหาที่เกิดขึ้นในส่วนของการติดตั้งเกิดจากรูปแบบกลไกการขับเคลื่อนไม่เหมาะสมสำหรับการติดตั้ง จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ พบว่า การวัดค่ากำลังบ่งชี้จำเป็นต้องติดตั้ง pressure transducer ภายใน expansion space และ compression space ซึ่งเครื่องยนต์ที่ใช้

ในงานวิจัยดังกล่าวจะเป็นเครื่องยนต์ที่มีกลไกการขับเคลื่อนแบบ แอลฟา และแกมมา แสดงดังรูปที่ ค-7ก และ ค-7ข



รูปที่ ค-7 ตำแหน่งที่สามารถทำการติดตั้ง pressure transducer ได้

กลไก 2 รูปแบบนี้ expansion space และ compression space จะไม่ได้อยู่ในกระบอกสูบเดียวกันทำให้สามารถติดตั้ง pressure transducer ได้ง่าย ซึ่งเครื่องยนต์ของ Koichi hirata [1] และ Artin der minassians [6] เป็นแบบแกมมา และเครื่องยนต์ของ David Heywood [17] และ Noburu kagawa [18] เป็นแบบแอลฟา แต่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีอยู่นั้นเป็นแบบ เบต้า แสดงดังรูปที่ ค-8 กลไกการขับเคลื่อนแบบนี้ expansion space และ compression space จะอยู่ในกระบอกสูบเดียวกันทำให้การติดตั้ง pressure transducer ภายใน compression space ไม่สามารถทำได้เนื่องจาก compression space อยู่ติดกับเสื้อน้ำหล่อเย็นทำให้ไม่มีพื้นที่ในการติดตั้ง วิธีหนึ่งที่ผู้วิจัยคิดขึ้นสำหรับการติดตั้ง pressure transducer ทำโดยการติดตั้งผ่าน buffer space มายัง compression space โดยการเจาะรูที่ลูกสูบกำลังแล้วต่อท่อเพื่อวัดความดัน ซึ่งอาจทำการติดตั้ง pressure ได้ แต่วิธีดังกล่าวทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดสูงมากเนื่องจากการเคลื่อนที่ขึ้นลงของลูกสูบกำลัง ดังนั้นจากข้อจำกัดทางโครงสร้างของเครื่องยนต์ที่มีอยู่ทำให้ไม่สามารถติดตั้ง pressure transducer ได้



รูปที่ ค-8 กลไกแบบเบตาของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีอยู่

ค.2.2 ปัญหาจากความซับซ้อนของการต่อวงจรเพื่อลดสัญญาณรบกวน

การต่อวงจรลดสัญญาณรบกวนเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้การวัดมีความถูกต้องสูงขึ้น สามารถทำได้ตั้งแต่วงจรอย่างง่ายจนกระทั่งวงจรที่มีความซับซ้อนสูง แต่การวัดความดันและปริมาตรนั้นจำเป็นที่จะต้องต่อวงจรลดสัญญาณรบกวนที่มีความซับซ้อนสูงเพื่อให้ค่าของการวัดดังกล่าวมีความถูกต้องมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ นอกจากนี้ david Heywood ยังได้กล่าวอีกว่า ความถูกต้องของค่าปริมาตรมีผลต่อการประเมินค่ากำลังบ่งชี้อย่างมากอีกด้วย ดังนั้นการต่อวงจรลดสัญญาณรบกวนจึงมีจำเป็นต้องมีความซับซ้อนสูง ซึ่งทำให้การต่อวงจรทำได้ยาก

ค.2.3 ปัญหาจากระยะเวลาทำงานต่อ 1 รอบของโปรแกรม

การเก็บค่าความดันและปริมาตรให้ได้ทุกๆ 5 องศา โปรแกรมที่เขียนขึ้นจะต้องมีความเร็วในการทำงานมากกว่าหรือเท่ากับ 0.0008194 s ต่อ 1 รอบการทำงาน แต่โปรแกรมที่ใช้ในการวัดค่ากำลังบ่งชี้ที่มีความซับซ้อนสูงทั้งในส่วนการปรับแต่งสัญญาณ และการรับส่งสัญญาณ pressure transducer และ encoder มีผลทำให้ความเร็วในการทำงานของโปรแกรมลดลง ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถเก็บค่าความดันและปริมาตรได้ตามที่ต้องการ นอกจากความผิดพลาดของการวัดในส่วนของความล่าช้าของโปรแกรมแล้วยังมีความผิดพลาดในส่วนของการสัมพันธ์ของการส่งสัญญาณ shaft encoder เพื่อทำการเก็บค่าความดัน จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้การเขียนโปรแกรมเพื่อประเมินค่ากำลังบ่งชี้จากการวัดได้อย่างถูกต้องนั้นกระทำยาก ถึงแม้ว่าจะสามารถทำการวัดค่ากำลังบ่งชี้ได้แต่ค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้ อาจมีความถูกต้องไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการประเมินการสูญเสีย

ค.3 สรุปการประเมินความเป็นไปได้ในการวัดค่ากำลังบ่งชี้

การประเมินความเป็นไปได้ในการวัดค่ากำลังบ่งชี้ข้างต้น แสดงให้เห็นว่า การวัดค่ากำลังบ่งชี้มีข้อจำกัดต่างๆมากมาย ทั้งในส่วนของ การติดตั้ง pressure transducer ภายในเครื่องยนต์ ซึ่งไม่สามารถติดตั้งได้ การต่อวงจรลดสัญญาณรบกวนมีความซับซ้อนสูงเกินไป และ ระยะเวลาในการทำงานของโปรแกรมต่อ 1 รอบมีความเร็วไม่เพียงพอ ต่อการวัดค่าความดันและปริมาตร จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นทำให้ไม่สามารถวัดค่ากำลังบ่งชี้ได้ ถึงแม้ว่าการวัดกำลังบ่งชี้ด้วยวิธีการวัดข้างต้นสามารถทำได้ แต่ค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้ อาจมีความถูกต้องไม่เพียงพอสำหรับนำไปใช้ในการประเมินการสูญเสีย ดังนั้นการประเมินกลไกการสูญเสียโดยใช้ค่ากำลังบ่งชี้ที่ได้จากการวัด จึงไม่สามารถทำได้

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกฤษลิน ถมยาบัตร เกิดเมื่อวันที่ 25 มิถุนายน พ.ศ.2552 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อวันที่ 26 มีนาคม 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2551



