

รายการอ้างอิง

1. แม้น อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา การแพร่ของอะตอมในของแข็ง วิศวกรรม, 1998.
2. ฉัตรชัย หงษ์อุเทน การศึกษาการใช้พลังงานไฮโดรเจน สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
3. ฉัตรชัย หงษ์อุเทน การศึกษาการดัดแปลงใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับยานพาหนะ สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
4. ขวัญชัย จ้อยเจริญ การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายใน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
5. Buchner H. Energiespeicherung in Metallhydriden Springer-Verlag Wein, New York, 1982.
6. Fischer L. Hydrogen Storage Devices Using Metal Hydrides GFE Metalle und Metrialien GmbH, Nürnberg, 1999.
7. Petkov T., Vozirloglu T. N. and Sheffield J. W. (1989) An Out look of Hydrogen as an Automotive Fuel Int. J. Hydrogen Energy Vol. 14, No. 7, P. 449-474.
8. Smith W. F. Principle of materials Science and Engineering McGraw-Hill, Inc., New York, 1996.
9. Cambell, J. E. Effect of Hydrogen Gas on Metals at Ambient Temperature DMIC S-31, Battelle Memorial Institute (AD-869990), 1970.
10. Ali T-Raissi, Arundhati Banerjee, Kenneth Sheinkopf Metal Hydride storage requirements for transportation applications Florida Solar Energy Center, USA, 1994
11. Fritz Werner Operation and Maintenance Guide for Metalhydride storage tank KW5 Industrie Ausrüstungen GmbH, Germany, 2001.
12. Strickland, G.; Reilly, J.; and Wiswall, R. H., Jr. An Engineering Scale Energy Storage Reservoir of Iron Titanium Hydride The Hydrogen Economy Miami Energy (THEME) Conf. Proc., Plenum Press, 1975, pp. S4-9 to S4-21.
13. Johnson, J.R. and J. J. Reilly (1977). The use of maganese substituted ferrotitanium alloys for energy storages Proc. International Conference on Alternative Sources. Miami, Florida.

14. A. F. Andersen and A. J. Maeland Hydride for energy storage Proceeding of and International Symposium in Geilo, Norway, 1977.
15. L. K. Heung, T. Motyka, W. A. Dummers Hydrogen Storage Development for Utility Vehicles Savannah River Technology Center, USA, 2001.
16. Walt Pyle Hydrogen Storage Home Power, H-Ion Company, 1997.
17. Roy McAlister Hydrogen The American Hydrogen Association, USA, 1999

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 แสดงผลการทดสอบกับระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำ
ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P (bar)	Gas flow rate (g H ₂ /s)	Water flow rate (m ³ /h)
0	29	29	0	0.00	5	0.1267	0.00
2	39	34	5	7.58	5	0.1267	1.30
4	44	38	6	9.10	5	0.1267	1.30
6	47	41	6	9.10	5	0.1267	1.30
8	54	48	6	9.45	5	0.1267	1.35
10	62	52	10	15.75	5	0.1267	1.35
12	64	58	6	9.45	5	0.1267	1.35
14	65	58	7	11.03	5	0.1267	1.35
16	65	58	7	11.03	5	0.1267	1.35

ตาราง ก-2 แสดงผลการทดสอบกับระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำ
ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P (bar)	Gas flow rate (g H ₂ /s)	Water flow rate (m ³ /h)
0	29	29	0	0.00	5	0.1372	0.00
2	40	35	5	7.58	5	0.1372	1.30
4	48	40	8	12.13	5	0.1372	1.30
6	54	46	8	12.60	5	0.1372	1.35
8	62	52	10	15.75	5	0.1372	1.35
10	64	58	6	9.80	5	0.1372	1.40
12	67	59	8	13.07	5	0.1372	1.40
14	67	59	8	13.07	5	0.1372	1.40
16	68	58	10	16.33	5	0.1372	1.40
18	70	59	11	17.97	5	0.1372	1.40
20	73	62	11	17.97	5	0.1372	1.40



ตาราง ก-3 แสดงผลการทดสอบกับระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำ
ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P (bar)	Gas flow rate (g H ₂ /s)	Water flow rate (m ³ /h)
0	29	29	0	0.00	5	0.1477	0.00
2	40	35	5	7.58	5	0.1477	1.30
4	49	41	8	12.13	5	0.1477	1.30
6	55	46	9	14.18	5	0.1477	1.35
8	63	53	10	15.75	5	0.1477	1.35
10	68	58	10	16.33	5	0.1477	1.40
12	68	59	9	14.70	5	0.1477	1.40
14	69	59	10	16.33	5	0.1477	1.40
16	70	61	9	14.70	5	0.1477	1.40
18	71	61	10	16.33	5	0.1477	1.40
20	72	61	11	17.97	5	0.1477	1.40

ตาราง ก-4 แสดงผลการทดสอบกับระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์เพื่อหาอัตราการใช้ของน้ำ
ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P (bar)	Gas flow rate (g H ₂ /s)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	29.00	29.00	0.00	0.00	5.00	0.1687	0.00
2.00	41.00	35.00	6.00	9.10	5.00	0.1687	1.30
4.00	50.00	44.00	6.00	9.10	5.00	0.1687	1.30
6.00	56.00	49.00	7.00	11.03	5.00	0.1687	1.35
8.00	64.00	55.00	9.00	14.18	5.00	0.1687	1.35
10.00	68.00	60.00	8.00	13.07	5.00	0.1687	1.40
12.00	69.00	61.00	8.00	13.07	5.00	0.1687	1.40
14.00	69.00	61.00	8.00	13.07	5.00	0.1687	1.40
16.00	70.00	62.00	8.00	13.07	5.00	0.1687	1.40
18.00	70.00	61.00	9.00	14.70	5.00	0.1687	1.40
20.00	70.00	61.00	9.00	14.70	5.00	0.1687	1.40

ตาราง ก-5 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 °C
 เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	33	33	0	0.00	26	0.1203	1.40
0.45	33	33	0	0.00	24	0.1203	1.40
0.67	33	32	1	1.63	22	0.1203	1.40
1.00	33	32	1	1.63	20	0.1203	1.40
1.67	33	32	1	1.63	18	0.1203	1.40
2.30	33	32	1	1.63	16	0.1203	1.40
3.00	33	31	2	3.27	14	0.1203	1.40
4.17	32	31	1	1.63	12	0.1203	1.40
5.67	32	31	1	1.63	10	0.1203	1.40
9.25	31	30	1	1.63	8	0.1203	1.40
22.12	31	30	1	1.63	6	0.1203	1.40
28.67	32	30	2	3.27	5	0.1203	1.40
31.75	31	30	1	1.63	4	0.1203	1.40

ตาราง ก-6 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 °C
 เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	32	32	0	0.00	24	0.1328	1.40
0.03	32	32	0	0.00	22	0.1328	1.40
0.08	32	32	0	0.00	20	0.1328	1.40
0.58	32	32	0	0.00	16	0.1328	1.40
1.00	32	32	0	0.00	14	0.1328	1.40
1.67	32	31	1	1.63	12	0.1328	1.40
2.77	32	31	1	1.63	10	0.1328	1.40
5.17	32	31	1	1.63	8	0.1328	1.40
9.50	32	31	1	1.63	6	0.1328	1.40
12.50	32	31	1	1.63	5	0.1328	1.40
15.42	31	31	0	0.00	4	0.1328	1.40

ตาราง ก-7 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 °C
 เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	33	33	0	0.00	27	0.1453	1.40
0.15	33	33	0	0.00	26	0.1453	1.40
0.35	33	32	1	1.63	24	0.1453	1.40
0.70	33	32	1	1.63	22	0.1453	1.40
0.98	33	32	1	1.63	20	0.1453	1.40
1.33	33	32	1	1.63	18	0.1453	1.40
1.67	33	32	1	1.63	16	0.1453	1.40
2.25	33	32	1	1.63	14	0.1453	1.40
2.75	33	31	2	3.27	12	0.1453	1.40
3.63	33	31	2	3.27	10	0.1453	1.40
5.42	32	31	1	1.63	8	0.1453	1.40
9.00	32	31	1	1.63	6	0.1453	1.40
13.58	31	30	1	1.63	5	0.1453	1.40
17.50	31	30	1	1.63	4	0.1453	1.40

ตาราง ก-8 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 °C
 เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	33	33	0	0.00	26	0.1703	1.40
0.08	33	32	1	1.63	24	0.1703	1.40
0.25	33	32	1	1.63	22	0.1703	1.40
0.50	33	32	1	1.63	20	0.1703	1.40
0.87	33	32	1	1.63	18	0.1703	1.40
1.33	33	32	1	1.63	16	0.1703	1.40
1.47	33	32	1	1.63	14	0.1703	1.40
1.75	33	32	1	1.63	12	0.1703	1.40
2.47	33	32	1	1.63	10	0.1703	1.40
3.33	33	32	1	1.63	8	0.1703	1.40
5.63	32	31	1	1.63	6	0.1703	1.40
7.88	32	31	1	1.63	5	0.1703	1.40
11.93	30	29	1	1.63	4	0.1703	1.40

ตาราง ก-9 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 50 °C
 เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	50	50	0	0.00	26	0.1203	1.40
0.17	49	49	0	0.00	24	0.1203	1.40
0.33	49	48	1	1.63	22	0.1203	1.40
1.67	49	47	2	3.27	20	0.1203	1.40
3.55	48	46	2	3.27	18	0.1203	1.40
5.98	47	45	2	3.27	16	0.1203	1.40
9.87	47	45	2	3.27	14	0.1203	1.40
13.98	49	47	2	3.27	12	0.1203	1.40
39.63	49	47	2	3.27	10	0.1203	1.40
65.17	48	47	1	1.63	8	0.1203	1.40
76.70	48	47	1	1.63	6	0.1203	1.40
78.70	48	47	1	1.63	5	0.1203	1.40
80.27	48	47	1	1.63	4	0.1203	1.40

ตาราง ก-10 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 50 °C
 เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	50	50	0	0.00	24	0.1328	1.40
0.10	50	50	0	0.00	22	0.1328	1.40
1.10	50	50	0	0.00	20	0.1328	1.40
2.23	51	50	1	1.63	18	0.1328	1.40
4.12	52	50	2	3.27	16	0.1328	1.40
6.83	52	50	2	3.27	14	0.1328	1.40
10.00	52	49	3	4.90	12	0.1328	1.40
27.42	51	50	1	1.63	10	0.1328	1.40
47.88	50	49	1	1.63	8	0.1328	1.40
58.27	49	48	1	1.63	6	0.1328	1.40
60.43	49	48	1	1.63	5	0.1328	1.40
62.25	49	48	1	1.63	4	0.1328	1.40

ตาราง ก-11 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮโดรด์ 50 °C
 เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m ³ /h)
0.13	50	50	0	0.00	26	0.1453	1.40
0.27	50	50	0	0.00	24	0.1453	1.40
0.42	51	50	1	1.63	22	0.1453	1.40
1.15	52	50	2	3.27	20	0.1453	1.40
2.17	52	49	3	4.90	18	0.1453	1.40
3.42	51	50	1	1.63	16	0.1453	1.40
5.43	52	50	2	3.27	14	0.1453	1.40
8.18	51	50	1	1.63	12	0.1453	1.40
20.75	50	49	1	1.63	10	0.1453	1.40
37.98	49	48	1	1.63	8	0.1453	1.40
48.07	49	48	1	1.63	6	0.1453	1.40
50.93	49	48	1	1.63	5	0.1453	1.40
54.72	49	48	1	1.63	4	0.1453	1.40

ตาราง ก-12 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 50 °C
 เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	50	50	0	0.00	28	0.1703	1.40
0.30	50	50	0	0.00	27	0.1703	1.40
0.47	51	51	0	0.00	26	0.1703	1.40
0.58	51	50	1	1.63	24	0.1703	1.40
0.77	52	50	2	3.27	22	0.1703	1.40
1.03	52	50	2	3.27	20	0.1703	1.40
1.58	52	49	3	4.90	18	0.1703	1.40
2.08	51	50	1	1.63	16	0.1703	1.40
2.92	52	50	2	3.27	14	0.1703	1.40
4.80	51	50	1	1.63	12	0.1703	1.40
9.17	50	49	1	1.63	10	0.1703	1.40
21.48	49	48	1	1.63	8	0.1703	1.40
30.58	49	48	1	1.63	6	0.1703	1.40
32.98	49	48	1	1.63	5	0.1703	1.40
35.10	49	48	1	1.63	4	0.1703	1.40

ตาราง ก-13 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 70 °C
 เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	69	69	0	0.00	20	0.1703	1.40
0.25	69	69	0	0.00	18	0.1703	1.40
6.08	69	68	1	1.63	16	0.1703	1.40
18.98	68	67	1	1.63	14	0.1703	1.40
26.63	68	67	1	1.63	12	0.1703	1.40
30.22	68	67	1	1.63	10	0.1703	1.40
32.67	68	67	1	1.63	8	0.1703	1.40
34.20	68	67	1	1.63	6	0.1703	1.40
34.73	68	67	1	1.63	5	0.1703	1.40
35.50	68	67	1	1.63	4	0.1703	1.40

ตาราง ก-14 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 °C
 อัตราการไหลของน้ำ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P (bar)	Volumetric H ₂ in MH Storage (liter)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	32	32	0	0.00	0.0	0.0	1.4
0.83	32	32	0	0.00	5.0	174.5	1.4
1.33	32	33	1	1.63	10.0	390.2	1.4
1.85	32	33	1	1.63	15.0	606.0	1.4
2.75	32	33	1	1.63	20.0	821.8	1.4
3.83	32	33	1	1.63	25.0	1,037.5	1.4
4.58	32	33	1	1.63	30.0	1,253.3	1.4
5.75	32	33	1	1.63	35.0	1,469.0	1.4
6.83	32	33	1	1.63	40.0	1,684.8	1.4
8.67	32	33	1	1.63	45.0	1,900.6	1.4
11.08	32	32.5	0.5	0.82	50.0	2,116.3	1.4
15.33	32	32.5	0.5	0.82	55.0	2,332.1	1.4
16.00	32	32	0	0.00	55.0	2,332.1	1.4
16.42	32	32	0	0.00	55.0	2,332.1	1.4

ตาราง ก-15 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 °C
 อัตราการไหลของน้ำ 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P (bar)	Volumetric H ₂ in MH Storage (liter)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	31	31	0	0.00	0.0	0.0	2.0
0.92	31	31	0	0.00	5.0	174.5	2.0
1.58	32	33	1	2.33	10.0	390.2	2.0
2.82	32	33	1	2.33	15.0	606.0	2.0
3.97	32	33	1	2.33	20.0	821.8	2.0
5.53	32	33	1	2.33	25.0	1,037.5	2.0
6.75	32	33	1	2.33	30.0	1,253.3	2.0
9.42	32	33	1	2.33	35.0	1,469.0	2.0
13.08	32	32.5	0.5	1.17	40.0	1,684.8	2.0
16.20	32	32.5	0.5	1.17	40.0	1,684.8	2.0
17.72	32	32	0	0.00	40.0	1,684.8	2.0

ตาราง ก-16 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 °C
 อัตราการไหลของน้ำ 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P (bar)	Volumetric H ₂ in MH Storage (liter)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	33	33	0	0.00	0.0	0.0	2.5
0.67	33	33	0	0.00	5.0	174.5	2.5
1.33	33	33	0	0.00	10.0	390.2	2.5
1.83	33	34	1	2.92	15.0	606.0	2.5
2.92	32	33	1	2.92	20.0	821.8	2.5
4.55	32	33	1	2.92	25.0	1,037.5	2.5
6.73	32	33	1	2.92	30.0	1,253.3	2.5
11.00	32	33	1	2.92	35.0	1,469.0	2.5
17.00	32	32	0	0.00	35.0	1,469.0	2.5
19.72	32	32	0	0.00	35.0	1,469.0	2.5

ตาราง ก-17 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 °C
 อัตราการไหลของน้ำ 3.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P (bar)	Volumetric H ₂ in MH Storage (liter)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	32	32	0	0.00	0.0	0.0	3.0
1.00	32	33	1	3.50	5.0	174.5	3.0
1.67	32	34	2	7.00	10.0	390.2	3.0
2.33	33	34	1	3.50	15.0	606.0	3.0
4.50	33	34	1	3.50	20.0	821.8	3.0
10.50	33	34	1	3.50	25.0	1,037.5	3.0
13.50	33	33	0	0.00	25.0	1,037.5	3.0
14.50	33	33	0	0.00	25.0	1,037.5	3.0

ตาราง ก-18 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 °C อุณหภูมิถึง 50 °C
 อัตราการไหลของน้ำ 3.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Volumetric H ₂ in MH Storage (liter)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	32	32	0	0.00	0.0	0.0	3.0
0.83	31	31	0	0.00	5.0	174.5	3.0
2.78	30	32	2	7.00	10.0	390.2	3.0
3.75	30	32	2	7.00	15.0	606.0	3.0
5.10	32	33	1	3.50	25.0	1,037.5	3.0
5.57	32	33	1	3.50	30.0	1,253.3	3.0
6.60	32	33	1	3.50	40.0	1,684.8	3.0
7.30	32	33	1	3.50	45.0	1,900.6	3.0
8.52	32	33	1	3.50	50.0	2,116.3	3.0
9.83	32	33	1	3.50	60.0	2,547.8	3.0
12.33	32	33	1	3.50	70.0	2,979.4	3.0
18.42	33	34	1	3.50	78.0	3,324.6	3.0
24.08	33	34	1	3.50	80.0	3,410.9	3.0
30.25	33	33	0	0.00	82.0	3,497.2	3.0

ตาราง ก-19 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์
 ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 50 °C
 อัตราการไหลของน้ำ 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Volumetric H ₂ in MH Storage (liter)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	50	50	0	0.00	0	0.0	2.0
1.00	50	50	0	0.00	10	390.2	2.0
2.67	50	51	1	2.33	15	606.0	2.0
3.43	50	51	1	2.33	18	735.5	2.0
4.80	51	52	1	2.33	20	821.8	2.0
6.00	51	52	1	2.33	22	908.1	2.0
8.50	51	52	1	2.33	25	1,037.5	2.0
10.43	51	52	1	2.33	30	1,253.3	2.0
13.50	51	52	1	2.33	35	1,469.0	2.0
15.65	51	52	1	2.33	36	1,512.2	2.0
29.57	51	52	1	2.33	45	1,900.6	2.0
45.17	51	51	0	0.00	45	1,900.6	2.0

ตาราง ก-20 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน
เมื่อต่อเข้ากับหม้อน้ำในรถยนต์ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	32	32	0	0.00	16	0.1203	0.00
0.22	32	32	0	0.00	14	0.1203	0.00
1.00	39	37	2	1.87	13	0.1203	0.80
2.42	42	41	1	1.05	12	0.1203	0.90
3.80	48	47	1	1.05	11	0.1203	0.90
6.82	51	50	1	1.17	10.8	0.1203	1.00
8.00	52	51	1	1.28	10.7	0.1203	1.10
11.75	53	52	1	1.28	10.6	0.1203	1.10
14.93	55	54	1	1.28	10.5	0.1203	1.10
19.65	57	56	1	1.28	10.4	0.1203	1.10
24.87	58	57	1	1.28	10.3	0.1203	1.10
28.97	59	57	2	2.57	10.2	0.1203	1.10
35.75	58	57	1	1.28	10.1	0.1203	1.10
41.30	57	56	1	1.28	10	0.1203	1.10
53.05	57	56	1	1.28	9	0.1203	1.10
57.17	57	56	1	1.28	8.5	0.1203	1.10
61.38	57	56	1	1.28	8.4	0.1203	1.10
64.42	57	56	1	1.28	8	0.1203	1.10
68.50	57	56	1	1.28	6	0.1203	1.10
72.38	57	56	1	1.28	5	0.1203	1.10
72.90	57	56	1	1.28	4.5	0.1203	1.10
73.93	57	56	1	1.28	4	0.1203	1.10

ตาราง ก-21 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน
เมื่อต่อเข้ากับหม้อน้ำในรถยนต์ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	32	32	0	0.00	20	0.1328	0.00
0.17	32	32	0	0.00	19	0.1328	0.00
0.75	33	31	2	0.00	18	0.1328	0.00
1.40	39	36	3	2.80	16	0.1328	0.80
3.07	43	41	2	2.33	14	0.1328	1.00
4.50	48	46	2	2.80	12	0.1328	1.20
7.47	48	46	2	3.03	10.7	0.1328	1.30
10.42	50	48	2	3.03	10.6	0.1328	1.30
14.95	52	51	1	1.52	10.5	0.1328	1.30
19.50	54	52	2	3.03	10.4	0.1328	1.30
24.00	54	52	2	3.03	10.3	0.1328	1.30
28.13	59	57	2	3.03	10.2	0.1328	1.30
34.40	59	57	2	3.03	10.2	0.1328	1.30
36.58	59	58	1	1.52	10.2	0.1328	1.30
41.17	59	58	1	1.52	10.1	0.1328	1.30
44.07	59	58	1	1.52	10	0.1328	1.30
45.80	59	58	1	1.52	10	0.1328	1.30
47.63	59	58	1	1.52	9	0.1328	1.30
48.78	59	58	1	1.52	8	0.1328	1.30
49.95	60	59	1	1.52	7	0.1328	1.30
50.82	61	60	1	1.52	6	0.1328	1.30
51.42	61	60	1	1.52	5	0.1328	1.30
52.15	61	60	1	1.52	4	0.1328	1.30

ตาราง ก-22 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน
เมื่อต่อเข้ากับหม้อน้ำในรถยนต์ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	33	33	0	0.00	20	0.1453	0.00
0.13	33	33	0	0.00	19	0.1453	0.00
0.56	35	33	2	0.00	18	0.1453	0.00
1.13	39	36	3	2.80	16	0.1453	0.80
2.83	43	41	2	2.33	14	0.1453	1.00
3.96	48	46	2	2.80	12	0.1453	1.20
5.73	48	46	2	3.03	10.7	0.1453	1.30
7.93	50	48	2	3.03	10.6	0.1453	1.30
10.86	52	51	1	1.52	10.5	0.1453	1.30
13.58	54	52	2	3.03	10.4	0.1453	1.30
16.29	54	52	2	3.15	10.3	0.1453	1.35
18.85	59	57	2	3.15	10.2	0.1453	1.35
22.39	59	57	2	3.15	10.2	0.1453	1.35
24.28	59	58	1	1.58	10.2	0.1453	1.35
28.13	59	58	1	1.58	10.1	0.1453	1.35
30.84	59	58	1	1.58	10	0.1453	1.35
33.73	59	58	1	1.58	10	0.1453	1.35
35.27	59	58	1	1.58	9	0.1453	1.35
37.81	59	58	1	1.58	8	0.1453	1.35
39.23	60	59	1	1.58	7	0.1453	1.35
40.33	60	59	1	1.58	6	0.1453	1.35
41.09	61	60	1	1.58	5	0.1453	1.35
41.76	61	60	1	1.58	4	0.1453	1.35

ตาราง ก-23 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรค์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน
เมื่อต่อเข้ากับหม้อน้ำในรถยนต์ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที

t (min)	Temp _{in} (°C)	Temp _{out} (°C)	ΔT (°C)	Q (kJ/s)	P _{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m ³ /h)
0.00	33	33	0	0.00	20	0.1703	0.00
0.08	32	32	0	0.00	18	0.1703	0.00
0.37	33	31	2	0.00	16	0.1703	0.00
0.85	39	36	3	2.80	14	0.1703	0.80
2.58	43	41	2	2.33	12	0.1703	1.00
3.42	48	46	2	2.80	11	0.1703	1.20
3.98	48	46	2	3.03	10.5	0.1703	1.30
5.45	50	48	2	3.27	10.2	0.1703	1.40
6.77	52	51	1	1.63	10.1	0.1703	1.40
7.65	54	52	2	3.27	10	0.1703	1.40
8.58	54	52	2	3.27	10	0.1703	1.40
9.57	59	57	2	3.27	10	0.1703	1.40
10.38	59	57	2	3.27	10	0.1703	1.40
11.97	59	58	1	1.63	10	0.1703	1.40
15.08	59	58	1	1.63	10	0.1703	1.40
17.62	59	58	1	1.63	10	0.1703	1.40
21.67	59	58	1	1.63	10	0.1703	1.40
22.90	59	58	1	1.63	10	0.1703	1.40
26.83	59	58	1	1.63	9	0.1703	1.40
28.50	59	58	1	1.63	8	0.1703	1.40
29.85	60	59	1	1.63	7	0.1703	1.40
30.77	61	60	1	1.63	6	0.1703	1.40
31.37	61	60	1	1.63	5	0.1703	1.40
32.18	61	60	1	1.63	4	0.1703	1.40

ภาคผนวก ข

ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้งานและการบำรุงรักษา ถังเมทัลไฮไดรด์ KW 5

ข้อมูลของถังเมทัลไฮไดรด์ KW 5

Type KW5

Specification :

Effective capacity :	approx. 5 m ³ Hydrogen
Designed pressure:	50 bar (100 °C)
Charging pressure:	30 bar (30 °C)
Desorption pressure:	approx. 5-6 bar (15 °C), approx. 10-12 bar (30 °C)
Extraction:	maximum 4 NI H ₂ /s Pressure reducing valve necessary, not in the scope of delivery
Weight:	approx. 50 kg
Dimension:	approx. 660 x 200 x 175 mm
Material:	steel
Design:	elements inside, water cooled/ heated

ตารางที่ ข-1 Alloy types for GfE Hydralloy[®] hydrogen storage alloys

Alloy class	A	B	D	E
Type	AB	AB ₂	A ₂ B	AB ₅
Alloy components	A: Ti	A: Ti, Zr	A: Mn	A: MM, La, Ce
	B: Fe, Mn	B: V, Fe, Cr, Mn, Ni	B: Ni	B: Ni (Mn, Al, Fe, Co)

การใช้งานและการบำรุงรักษาถังเมทัลไฮโดรด์ KW 5 (ต่อ)

หลักการทำงาน

เมทัลไฮโดรด์ เป็นโลหะผสมที่สามารถดูดซับไฮโดรเจนเข้าไปเก็บไว้ในตัวเองและคายไฮโดรเจนออกมาได้ โดยกระบวนการดูดซับไฮโดรเจนจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ส่วนกระบวนการคายหรือจ่ายไฮโดรเจนจะเป็นกระบวนการดูดความร้อน

ซึ่งกระบวนการทั้งสองนี้ จะดำเนินไปโดยมีกฎเกณฑ์ที่แน่นอนของปฏิกิริยาสมดุลทางเคมี โดยความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความดันในถังเมทัลไฮโดรด์ และปริมาณไฮโดรเจนที่เก็บอยู่ในโลหะผสม สามารถแสดงได้โดยแผนภาพ PCI

การบรรจุไฮโดรเจนเข้าสู่ถังเก็บเมทัลไฮโดรด์

ความดันสูงสุดที่อนุญาตให้ใช้งานได้ คือ 50 bar แต่ค่าความดันสำหรับการบรรจุไฮโดรเจนที่แนะนำให้อยู่ในช่วง 10 - 20 bar สำหรับกรณีเป็นถึงเปล่าที่เริ่มทำการบรรจุ ส่วนความดันในช่วง 20 - 30 bar จะใช้สำหรับการบรรจุไฮโดรเจนเข้าสู่ถังอย่างสมบูรณ์

การบรรจุไฮโดรเจนควรเริ่มต้นทำที่อุณหภูมิตั้งประมาณ 20 °C และในขณะที่ทำการบรรจุอุณหภูมิของถังจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่าประมาณ 40 – 60 °C และกระบวนการบรรจุจะเสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์เมื่ออุณหภูมิถึงกลับไปสู่ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น สำหรับการบรรจุไฮโดรเจนอย่างรวดเร็ว ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะต้องถูกถ่ายเทออกไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยของเหลวตัวกลางช่วยในการถ่ายเทความร้อน แต่ความดันของของไหลตัวกลางที่ใช้จะต้องไม่สูงเกินกว่า 0.6 bar

เพื่อให้ถังเมทัลไฮโดรด์คงคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการดูดซับไฮโดรเจน ไฮโดรเจนที่นำมาใช้บรรจุจะต้องมีความบริสุทธิ์ แก๊สอื่นที่นอกเหนือจากไฮโดรเจน หรือ อาร์กอน จะต้องได้รับการป้องกันไม่ให้เข้าสู่ถัง

การใช้งานและการบำรุงรักษาถังเมทัลไฮไดรด์ KW 5 (ต่อ)

นอกจากนี้ ก่อนการต่อท่อ หรือ ข้อต่อใดๆ เข้ากับถังเมทัลไฮไดรด์ จะต้องไล่อากาศที่ค้างอยู่ในท่อออกให้หมดโดยการเปิดให้แก๊สไฮโดรเจนไหลออกมา เป็นการดันเอาอากาศส่วนนั้นออกไปก่อน เพื่อป้องกันอากาศเข้าสู่ถัง

ข้อควรระวัง : ห้ามให้ความร้อนแก่ถังเมทัลไฮไดรด์ที่บรรจุไฮโดรเจนอย่างสมบูรณ์ (Fully charge) ในขณะที่วาล์วจ่ายไฮโดรเจนยังไม่ได้เปิด เนื่องจากจะทำให้ความดันภายในถังเพิ่มสูงขึ้นจนอาจเกิดอันตรายได้

การจ่ายไฮโดรเจนออกจากถังเมทัลไฮไดรด์

ไฮโดรเจนจะถูกจ่ายออกมาจากเมทัลไฮไดรด์ได้เมื่อตัวเมทัลไฮไดรด์ได้รับความร้อนจากของเหลวตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างเพียงพอ และช่วงเวลาที่สามารถจ่ายไฮโดรเจนคงที่ จะขึ้นอยู่กับปริมาณไฮโดรเจนที่จ่ายออก และปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ถัง โดยที่ความดันของไฮโดรเจนภายในถังจะแปรผันตามอุณหภูมิของตัวเมทัลไฮไดรด์ในขณะนั้น

นอกจากนี้ เมื่อใช้ไฮโดรเจนภายในถังจนหมดแล้ว ควรปิดวาล์วถังเมทัลไฮไดรด์ให้สนิท เนื่องจากเมื่อถังเย็นตัวลงจะเกิดสุญญากาศขึ้นเล็กน้อยภายในถัง

การบำรุงรักษา

การบำรุงรักษาให้ปฏิบัติตามข้อแนะนำที่ปรากฏอยู่บนตัวถัง แต่เมื่อความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนของถังลดลงมากกว่า 20% ถังเมทัลไฮไดรด์นั้นควรได้รับการกระตุ้น (Activation) หรือ เปลี่ยนใหม่ซึ่งต้องกระทำโดยส่งกลับไปยังบริษัทผู้ผลิตเท่านั้น

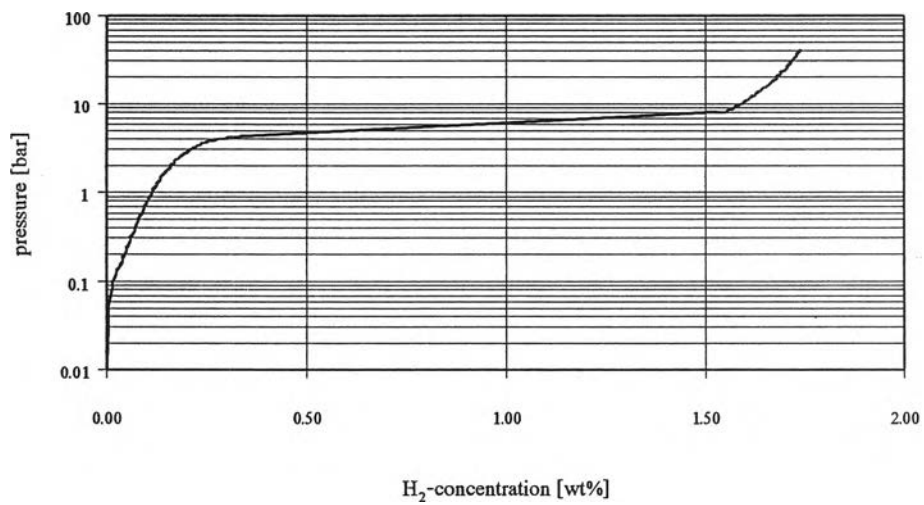
ข้อแนะนำเพื่อความปลอดภัย

- ถังเมทัลไฮไดรด์ต้องถูกเก็บรักษาไว้ในที่มีอุณหภูมิไม่สูงเกินกว่า 50 °C และต้องหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับแสงอาทิตย์โดยตรง

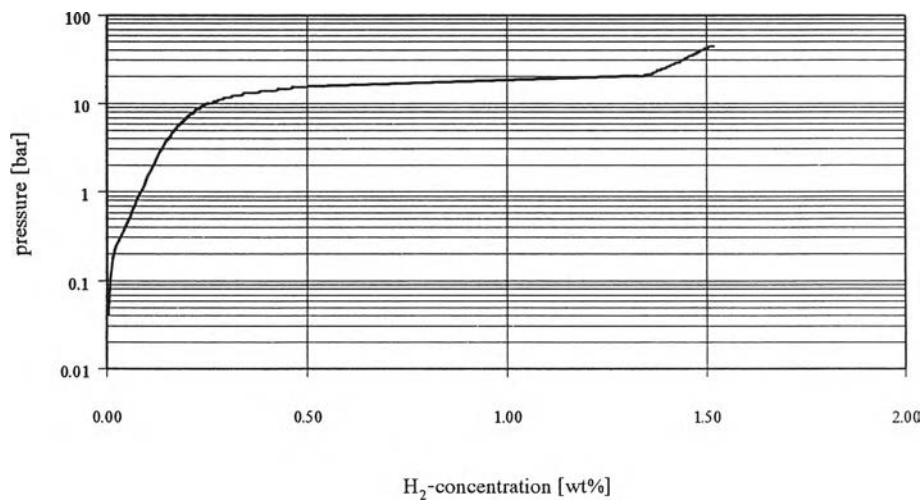
การใช้งานและการบำรุงรักษาดังเมทัลไฮไดรด์ KW 5 (ต่อ)

- ห้ามเปิดถังเมทัลไฮไดรด์โดยการจัด หรือ กระทบเนื่องจากโลหะผสมของเมทัลไฮไดรด์สามารถติดไฟได้
- ถังเก็บไฮโดรเจนต้องเก็บให้ห่างจากเด็ก และอยู่ในสถานที่ที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก
- เก็บถังให้ห่างจากประกายไฟ บริเวณที่มีการสูบบุหรี่ หรือ แหล่งที่เป็นต้นกำเนิดไฟฟ้าสถิต

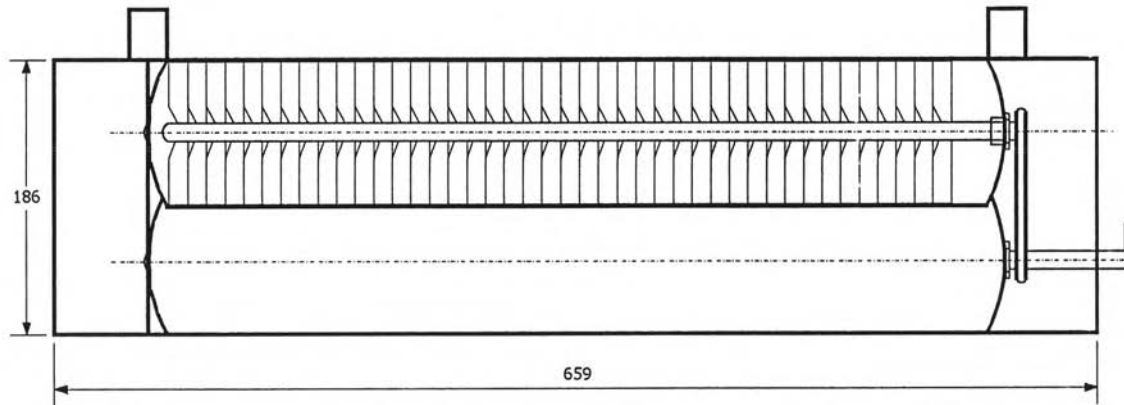
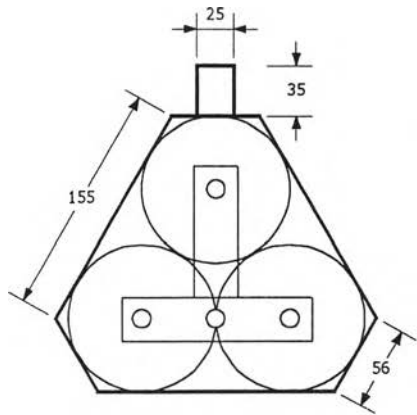
แผนภาพ PCI ของ Hydralloy® C5



รูปที่ ข-1 การคาย (Desorption) ที่ 20 °C



รูปที่ ข-2 การคาย (Desorption) ที่ 45 °C



Metal Hydride Storage Container KW5

Hydrogen Capacity	Approx. 5 Nm ³ H ₂
Metal Hydride Alloy	Hydralloy [®] C5
Metal Hydride Mass	30 kg.
Tank Volume	3x3.1 l = 9.3 l
Operating Pressure	Approx. 6 bars (20 °C)
Max. Charging Pressure	30 bars
Coolant Jacket Volume	Approx. 6 l
Max. Water Pressure	0.6 bars
Max. Temperature	100 °C
Tank Weight	Approx. 51 kg.

รูปที่ ข-3 แสดงถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ KW5

ภาคผนวก ค

ขั้นตอนการเติมและการใช้งานถังเมทัลไฮไดรด์ KW 5

ขั้นตอนการเติมไฮโดรเจนลงถังเก็บเมทัลไฮไดรด์

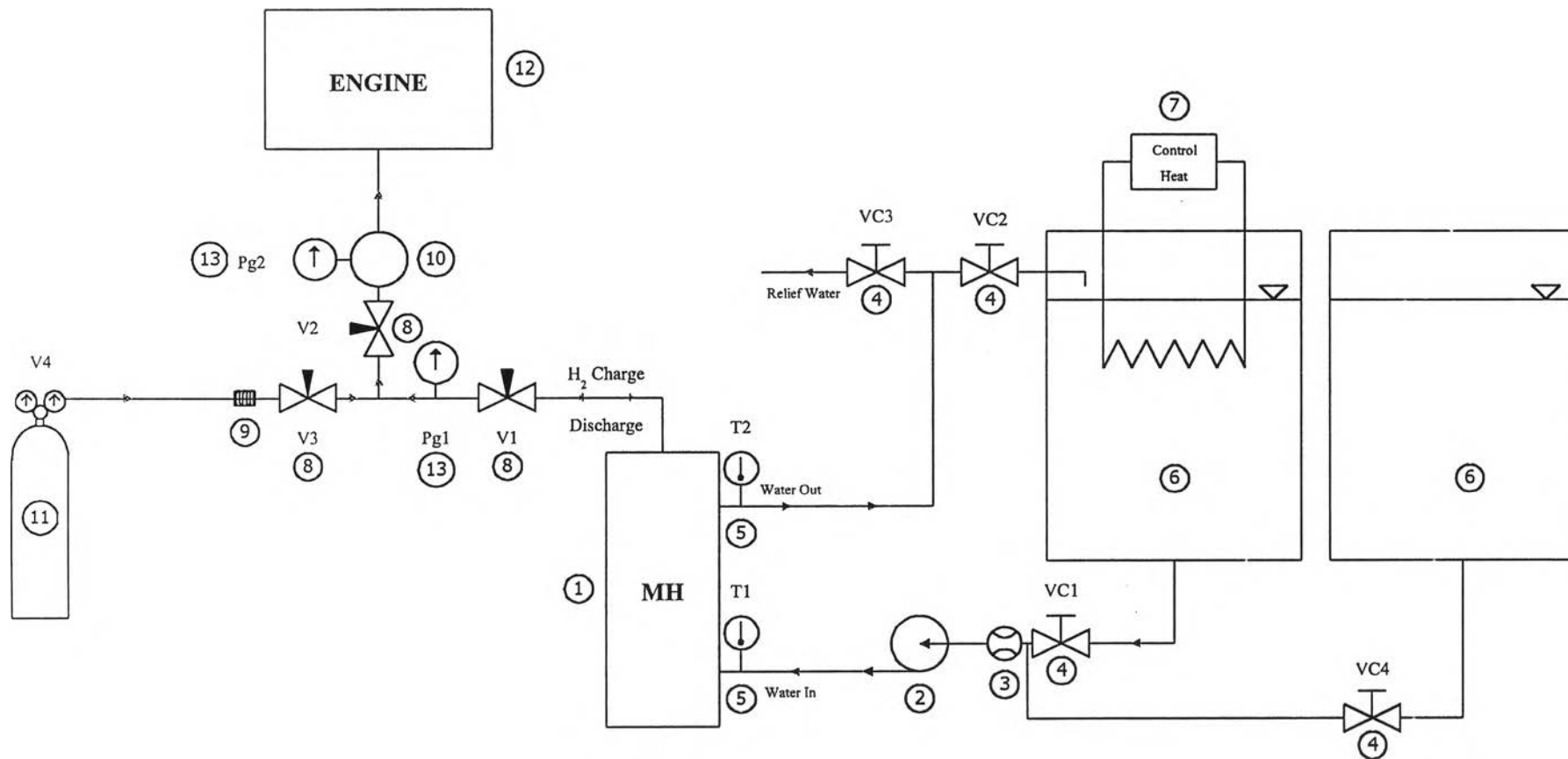
1. เมื่อสังเกตเห็นว่าความดันที่อ่านได้จาก P_{g1} ต่ำกว่า 4 bar แสดงว่าต้องเติมไฮโดรเจน
2. ต่อระบบเชื้อเพลิงของถังเมทัลไฮไดรด์เข้ากับถังเก็บไฮโดรเจนแบบความดันสูง ดังแสดงในรูปที่ ค-1
3. ปิดวาล์ว VC_1, VC_2
4. เดินเครื่องและรอนถังเมทัลไฮไดรด์มีอุณหภูมิลดลงพอประมาณ
5. เปิดวาล์ว V_4 ปรับค่าความดันที่ตัวคุมค่า (Regulator Pressure) ให้ได้ 10 bar
6. ค่อย ๆ เปิด V_3 ควบคุมไม่ให้ความดันที่ P_{g1} สูงไปจากค่าเดิม
7. เดินเครื่องต่ออีกประมาณ 30 วินาที ถึง 1 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีอากาศค้างอยู่ในท่อ
8. ปิดวาล์ว V_2 แล้วดับเครื่อง
9. เปิดวาล์ว V_1 และเปิดวาล์ว V_3 ให้ P_{g1} อ่านค่าได้ 20 bar เพื่อทำการบรรจุไฮโดรเจนลงในถังเมทัลไฮไดรด์
10. เมื่อถังเมทัลไฮไดรด์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ให้เปิดวาล์ว VC_3, VC_4 และปั๊ม ในระบบระบายน้ำ ก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์เพื่อระบายความร้อน
11. เมื่อถังเมทัลไฮไดรด์บรรจุไฮโดรเจนจนเต็ม ให้ปิดวาล์ว V_4 และปิดวาล์ว V_1 ตามลำดับ
12. เปิดวาล์ว V_2 เพื่อไล่ความดันค้างท่อก๊าซไฮโดรเจน จึงสามารถนำไปใช้งานได้

ขั้นตอนการใช้งาน

1. ปิดวาล์ว VC_3, VC_4 ในระบบน้ำหล่อเย็น
2. เปิดวาล์ว VC_1, VC_2
3. ขณะใช้งาน ถังเก็บไฮโดรเจนแบบความดันสูง, ตัวควบคุมที่หัวถัง และวาล์ว V_3 จะถูกตัดออกจากระบบ
4. เปิดวาล์ว V_1 ความดันไฮโดรเจนในถังเมทัลไฮไดรด์ที่ P_{g1} ต้องไม่ต่ำกว่า 5 bar
5. เปิดวาล์ว V_2 ความดันที่ P_{g2} ต้องอ่านได้ 5 bar (ห้ามสูงเกินกว่า 5 bar)

ขั้นตอนการเติมและการใช้งานถังเมทัลไฮไดรด์ KW 5 (ต่อ)

6. เปิดวาล์วที่ระบบท่อเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของรถยนต์ และทำการเดินเครื่องได้
7. ขณะเดินเครื่องความดันที่ P_{g_2} น้อยกว่า 4 bar. ถ้าวาล์วไฮโดรเจนหมด ให้ทำการเติมไฮโดรเจนลงถังเก็บเมทัลไฮไดรด์



- | | | | |
|-------------------------------|----------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 1. Metal Hydride Storage Tank | 5. Temperature Measurement | 9. Quick Connector | 13. Pressure Gauge |
| 2. Pump | 6. Water Storage Tank | 10. Regulator | |
| 3. Water Flowmeter | 7. Control Heat System | 11. Hydrogen High Pressure Tank | |
| 4. Ball Valve | 8. Needle Valve | 12. Engine | |

รูปที่ ค-1 แสดงขั้นตอนการเติมและการทำงานถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ KW5

ภาคผนวก ง

สารละลายของแข็งโลหะ

โลหะที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ส่วนน้อยจะเป็นโลหะบริสุทธิ์หรือเกือบบริสุทธิ์ ตัวอย่างเช่น ทองแดงที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.99% จะถูกใช้เป็นตัวนำสำหรับงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีการนำไฟฟ้าที่สูงมาก หรืออะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.99% Al)⁽¹⁾ จะถูกใช้สำหรับงานตกแต่งเนื่องจากเป็นโลหะที่มีพื้นผิวแวววาว แต่โดยส่วนใหญ่แล้ว มักจะเป็นโลหะที่มีโลหะอื่นหรือโลหะผสมอยู่ เพื่อให้โลหะนั้นมีคุณภาพพิเศษมากขึ้น เช่น ทำให้แข็งแรง ไม่เกิดสนิม ขยายตัวน้อย และทนต่อการกัดกร่อน เป็นต้น

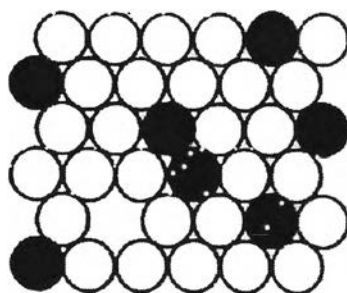
โลหะผสม เป็นของผสมของโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป หรืออาจเป็นโลหะผสมกับโลหะ โลหะผสมอาจจะมีโครงสร้างที่ค่อนข้างจะธรรมดา เช่น ปรอทกระสุนปืนจำพวกทองเหลือง (brass) ซึ่งประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด คือ ทองแดง 70% และสังกะสี 30% หรือโลหะผสมที่ค่อนข้างสลับซับซ้อน เช่น โลหะผสม superalloy Inconel 718 ที่มีโลหะนิกเกิลเป็นส่วนประกอบหลักซึ่งถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งในเครื่องยนต์ jet จะมีธาตุเป็นส่วนประกอบมากถึง 10 ชนิด โลหะผสมจัดว่าเป็นสารละลายของแข็ง คือ ของแข็งที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปกระจายอยู่ในโครงสร้างเดียวกัน มี 2 แบบ คือ

1. สารละลายของแข็งแบบแทนที่ (substitutional solid solution)
2. สารละลายของแข็งแบบสอดแทรก (interstitial solid solution)

สารละลายของแข็งแบบแทนที่

เกิดจากอะตอมของธาตุ 2 ชนิด คือ อะตอมของตัวถูกละลาย (solute atoms) สามารถเข้าไปแทนที่อะตอมของตัวทำละลาย (solvent atoms) ในโครงสร้างผลึกได้ ดังแสดงในรูปที่ ง-1 โครงสร้างผลึกของโลหะผสมชนิดนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่อาจจะเกิดการเสียรูปไปบ้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีขนาดอะตอมที่แตกต่างกัน

⁽¹⁾ เรียกว่า superpure aluminum



รูปที่ ง-1 แสดงสารละลายของแข็งแบบแทนที่ วงกลมสีเข้มกับสีขาวแสดงอะตอมของธาตุต่างชนิดกัน

สถานะที่อะตอมหนึ่งจะเข้าไปแทนที่อีกอะตอมหนึ่งได้ดี จะต้องมิลักษณะดังนี้คือ

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอะตอมทั้งสองจะต้องไม่ต่างกันเกิน 15%
2. โครงสร้างผลึกของธาตุทั้งสองจะต้องเหมือนกัน
3. สภาพไฟฟ้าลบ (electronegativity) จะต้องต่างกันไม่มากนัก มิฉะนั้นแล้วจะเกิดเป็นสารประกอบได้
4. จะต้องมีค่าเวเลนซ์เท่ากัน

ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอะตอมของธาตุทั้งสองที่เป็นส่วนประกอบในสารละลายของแข็งแตกต่างกันก็จะทำให้โครงสร้างผลึกเกิดการเสียรูป เนื่องจากเลตทิซของอะตอมสามารถยึดตัวหรือหลุดตัวได้ในปริมาณที่จำกัด ดังนั้น ความแตกต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอะตอมจึงถูกจำกัดไว้เพียงค่าหนึ่ง เพื่อที่จะรักษาสภาพโครงสร้างผลึกของสารละลายของแข็งได้เหมือนเดิม ถ้าความแตกต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอะตอมมากกว่า 15% แล้ว ความสามารถในการละลายก็จะเกิดขึ้นได้ยาก

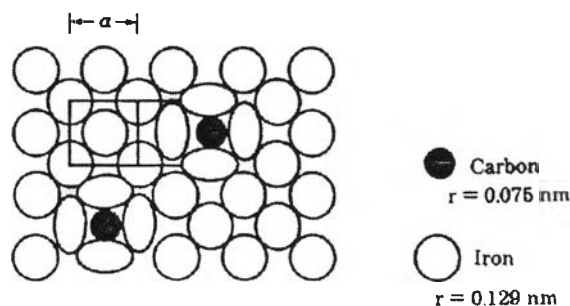
ถ้าตัวถูกละลายและตัวทำละลายมีโครงสร้างที่เหมือนกัน ความสามารถในการละลายก็จะเกิดขึ้นได้ดี กล่าวคือถ้าธาตุทั้งสองสามารถละลายเข้ากันได้ดีในทุกสัดส่วนขององค์ประกอบแล้ว ธาตุทั้งสองก็จะต้องมีโครงสร้างผลึกที่เหมือนกัน นอกจากนี้ธาตุทั้งสองที่เป็นส่วนประกอบของสารละลายของแข็งก็จะต้องไม่มีสภาพไฟฟ้าลบที่แตกต่างกันมากนัก เพราะมิฉะนั้นแล้วธาตุที่มีสภาพไฟฟ้าลบต่ำก็จะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอน ส่วนธาตุที่มีสภาพไฟฟ้าลบสูงก็จะเกิดการรับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบขึ้น นอกจากนี้ถ้าธาตุทั้งสองมีค่าเวเลนซ์ที่เหมือนกัน ความสามารถในการละลายก็จะเกิดขึ้นได้ดี เพราะถ้าอิเล็กตรอนระหว่างอะตอมมีไม่เพียงพอแล้ว การรวมตัวของอะตอมก็จะเกิดขึ้นได้ไม่ดีซึ่งจะมีผลทำให้สถานะในการละลายของธาตุต่ำด้วย

สารละลายของแข็งแบบสอดแทรก

เป็นสารละลายของแข็งที่เกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมของตัวถูกละลายเข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างอะตอมของตัวทำละลายหรือ parent atoms ช่องว่างระหว่างอะตอมของตัวทำละลายนี้ถูกเรียกว่า ซอก (interstices) สารละลายของแข็งแบบสอดแทรกจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อขนาดของอะตอมของตัวทำละลายมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของอะตอมของตัวถูกละลาย ตัวอย่างของอะตอมที่มีขนาดเล็กและสามารถเข้าไปแทรกอยู่ในซอกเพื่อทำให้เกิดสารละลายของแข็งแบบสอดแทรก (interstitial solid solutions) ได้ อาทิ H, C, N และ O

ตัวอย่างของสารละลายของแข็งแบบสอดแทรกที่สำคัญ คือ อะตอมของคาร์บอนในเหล็ก γ ที่มีโครงสร้างแบบ FCC ซึ่งจะอยู่ตัวที่อุณหภูมิระหว่าง 912 – 1394 °C อะตอมของคาร์บอนจะเข้าไปแทรกในซอกระหว่างอะตอมของเหล็กได้สูงสุด 2.08% ที่อุณหภูมิ 1148 °C รูปที่ ง-2 แสดงโครงสร้างของเหล็กขณะที่อะตอมของคาร์บอนเข้าไปแทรกในซอกระหว่างอะตอมของเหล็ก ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าอะตอมของเหล็กที่อยู่รอบอะตอมของคาร์บอนจะเกิดการเสียรูปไปเล็กน้อย

เนื่องจากขนาดของซอกระหว่างอะตอมในเหล็ก γ ที่มีโครงสร้างแบบ FCC เท่ากับ 0.053 nm ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของซอกระหว่างอะตอมในเหล็ก α ที่มีโครงสร้างแบบ BCC คือ ประมาณ 0.036 nm จึงเป็นผลทำให้อะตอมของคาร์บอนที่มีขนาด 0.075 nm สามารถละลายในเหล็ก γ ที่มีโครงสร้างแบบ FCC (2.08%) ได้ดีกว่าเหล็ก α ที่มีโครงสร้างแบบ BCC (0.025%) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 723 °C เพียงเล็กน้อย



รูปที่ ง-2 แสดงสารละลายของแข็งแบบสอดแทรกของคาร์บอนในเหล็ก γ ที่มีโครงสร้างแบบ FCC ที่อุณหภูมิสูงกว่า 912 °C และเกิดการบิดเบี้ยวขึ้น (distortion) (คัดมาจาก L.H. Van Vlack, “Elements of Materials Science and Engineering”, 4th ed., Addison-Wesley, 1980, p.113)

ภาคผนวก จ

ตารางแสดงสมบัติต่าง ๆ

ตารางที่ จ-1 สมบัติของธาตุต่างๆ

ธาตุ	สัญลักษณ์	จุดหลอมเหลว (°C)	ความหนาแน่น ¹ (g/cm ³)	โครงสร้างผลึก ² (20 °C)
อะลูมิเนียม	Al	660	0.143	FCC
พลวง	Sb	630	0.138	Rhombohedral
สารหนู	As	817	0.125	Rhombohedral ³
แบเรียม	Ba	714	0.217	BCC ³
เบริลเลียม	Be	1278	0.113	HCP ³
โบรอน	B	2030	0.097	Orthorhombic
โบรมีน	Br	-7.2	0.119	Orthorhombic
แคดเมียม	Cd	321	0.148	HCP ³
แคลเซียม	Ca	846	0.197	FCC ³
คาร์บอน (แกรไฟต์)	C	3550	0.077	Hexagonal
ซีเซียม	Cs	28.7	0.190	BCC
คลอรีน	Cl	-101	0.099	Tetragonal
โครเมียม	Cr	1875	0.128	BCC ³
โคบอลต์	Co	1498	0.125	HCP ³
ทองแดง	Cu	1083	0.128	FCC
ฟลูออรีน	F	-220	0.071	
แกเลียม	Ga	29.8	0.135	Orthorhombic
เจอร์เมเนียม	Ge	937	0.139	Diamond cubic
ทองคำ	Au	1063	0.144	FCC
ฮีเลียม	He	-270	HCP
ไฮโดรเจน	H	-259	0.046	Hexagonal
อินเดียม	In	157	0.162	FC tetragonal
ไอโอดีน	I	114	0.136	Orthorhombic

สมบัติของธาตุต่างๆ (ต่อ)

ธาตุ	สัญลักษณ์	จุดหลอมเหลว (°C)	ความหนาแน่น ¹ (g/cm ³)	โครงสร้างผลึก ² (20 °C)
อิริเดียม	Ir	2454	0.135	FCC
เหล็ก	Fe	1536	0.124	BCC ³
ตะกั่ว	Pb	327	0.175	FCC
ลิเทียม	Li	180	0.157	BCC
แมกนีเซียม	Mg	650	0.160	HCP
แมงกานีส	Mn	1245	0.118	Cubic ³
ปรอท	Hg	-38.4	0.155	Rhombohedral
โมลิบดีนัม	Mo	2610	0.140	BCC
นีออน	Ne	-248.7	0.160	FCC
นิกเกิล	Ni	1453	0.125	FCC
ไนโอเบียม	Nb	2415	0.143	BCC
ไนโตรเจน	N	-240	0.071	Hexagonal ³
ออสเมียม	Os	2700	0.135	HCP
ออกซิเจน	O	-218	0.060	Cubic ³
แพลเลเดียม	Pd	1552	0.137	FCC
ฟอสฟอรัส (ขาว)	P	44.2	0.110	Cubic ³
แพลทินัม	Pt	1769	0.139	FCC
โพแทสเซียม	K	63.9	0.238	BCC
รีเนียม	Re	3180	0.138	HCP
โรเดียม	Rh	1966	0.134	FCC
รูทีเนียม	Ru	2500	0.125	HCP
สแกนเดียม	Sc	1539	0.160	FCC
ซิลิคอน	Si	1410	0.117	Diamond cubic
เงิน	Ag	961	0.144	FCC
โซเดียม	Na	97.8	0.192	BCC
สตรอนเชียม	Sr	76.8	0.215	FCC ³

สมบัติของธาตุต่างๆ (ต่อ)

ธาตุ	สัญลักษณ์	จุดหลอมเหลว (°C)	ความหนาแน่น ¹ (g/cm ³)	โครงสร้างผลึก ² (20 °C)
กำมะถัน (เหลือง)	S	119	0.104	Orthorhombic
แทนทาลัม	Ta	2996	0.143	BCC
ดีบุก	Sn	232	0.158	Tetragonal ³
ไทเทเนียม	Ti	1668	0.147	HCP ³
ทังสแตน	W	3410	0.141	BCC
ยูเรเนียม	U	1132	0.138	Orthorhombic ^{2,3}
วานาเดียม	V	1900	0.136	BCC
สังกะสี	Zn	419.5	0.137	HCP
เซอร์โคเนียม	Zr	1852	0.160	HCP ³

¹ Density of solid at 20°C

² $b = 0.5877 \text{ nm}$

³ Other crystal structures exist at other temperatures

ตารางที่ จ-2 สมบัติทางฟิสิกส์และความร้อนของโลหะ (ของแข็ง)

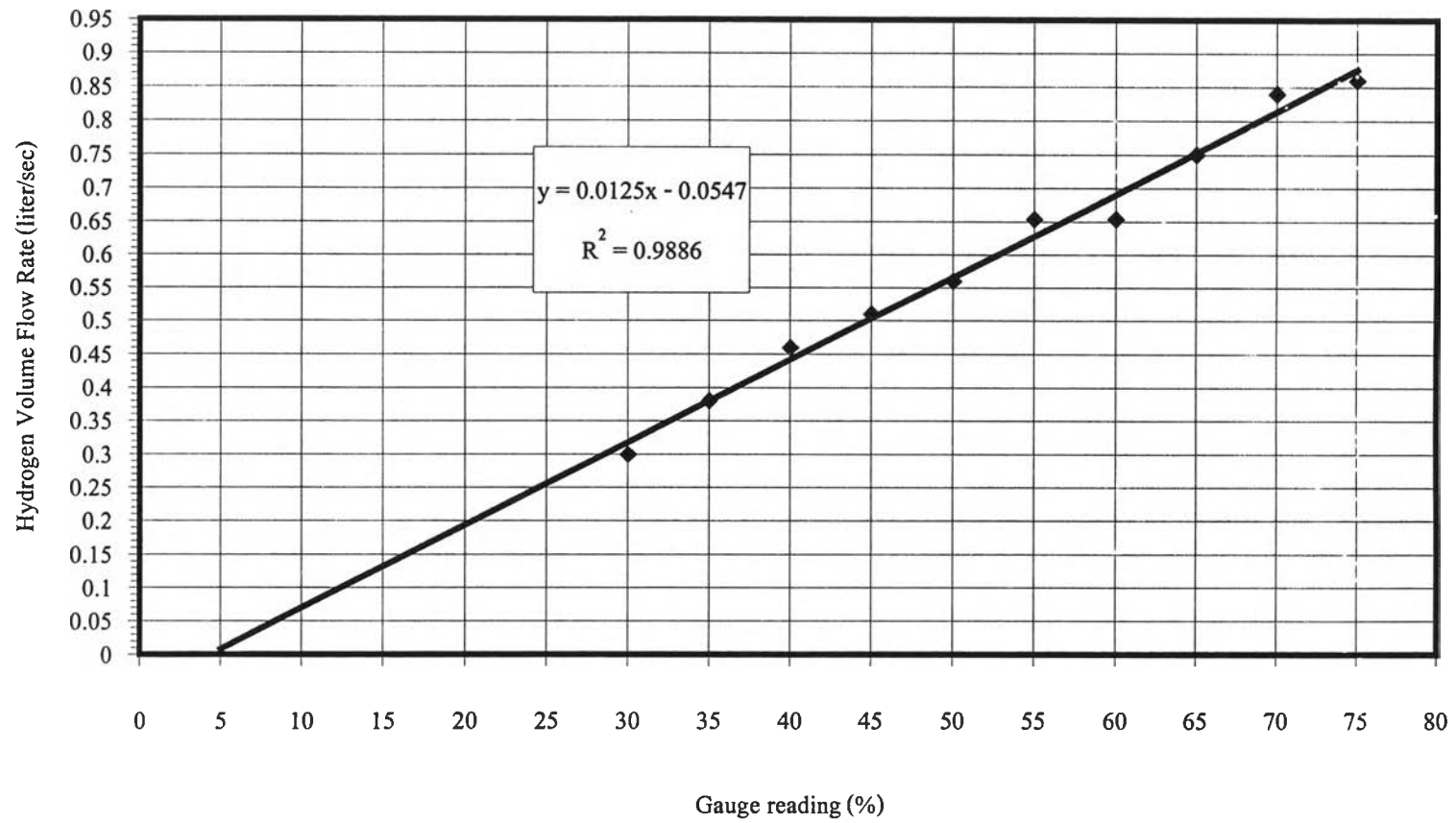
ชนิดของโลหะ	สมบัติที่ 300 K				λ (W/m·K) ที่อุณหภูมิต่างๆ (K)			
	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg·K)	λ (W/m·K)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)	400	600	800	1000
อะลูมิเนียมบริสุทธิ์	2702	903	237	97.1	240	231	218	-
โครเมียม	7160	449	93.7	29.1	90.9	80.7	71.3	65.4
ทองแดง	8933	385	401	117	393	379	366	352
บริสุทธิ์								
ตะกั่ว	11340	129	35.3	24.1	34	31.4	-	-
เหล็กบริสุทธิ์	7870	447	80.2	23.1	69.5	54.7	43.3	32.8
เหล็กกล้า								
C = 0.5%	7833	465	54	14.7	50.9	44.2	37.6	32.5
C = 1.0%	7801	473	43	11.7	42.7	38.9	34.1	30.5
C = 1.5%	7753	486	36	9.7	36	34.5	31.7	29.1
เหล็กผสม								
โครเมียมต่ำ								
Cr = 0.65%	7822	444	37.7	10.9	38.2	36.7	33.3	26.9
Cr = 1.0%	7858	442	42.3	12.2	42	39.1	34.5	27.4
Cr = 1.02%	7836	443	48.9	14.1	46.8	42.1	36.3	28.2
เหล็กกล้าไร้								
สนิม	8055	480	15.1	3.91	17.3	20	22.8	25.4
AISI 302	7900	477	14.9	3.95	16.6	19.8	22.6	25.4
AISI 304	8238	468	13.4	3.48	15.2	18.3	21.3	24.2
AISI 316	7978	480	14.2	3.71	15.8	18.9	21.9	24.7
AISI 347								
เงิน	10500	235	429	174	425	412	396	379
แพลทินัมบริสุทธิ์	21450	133	71.6	25.1	71.8	73.2	75.6	78.7

สมบัติทางฟิสิกส์และความร้อนของโลหะ (ของแข็ง) (ต่อ)

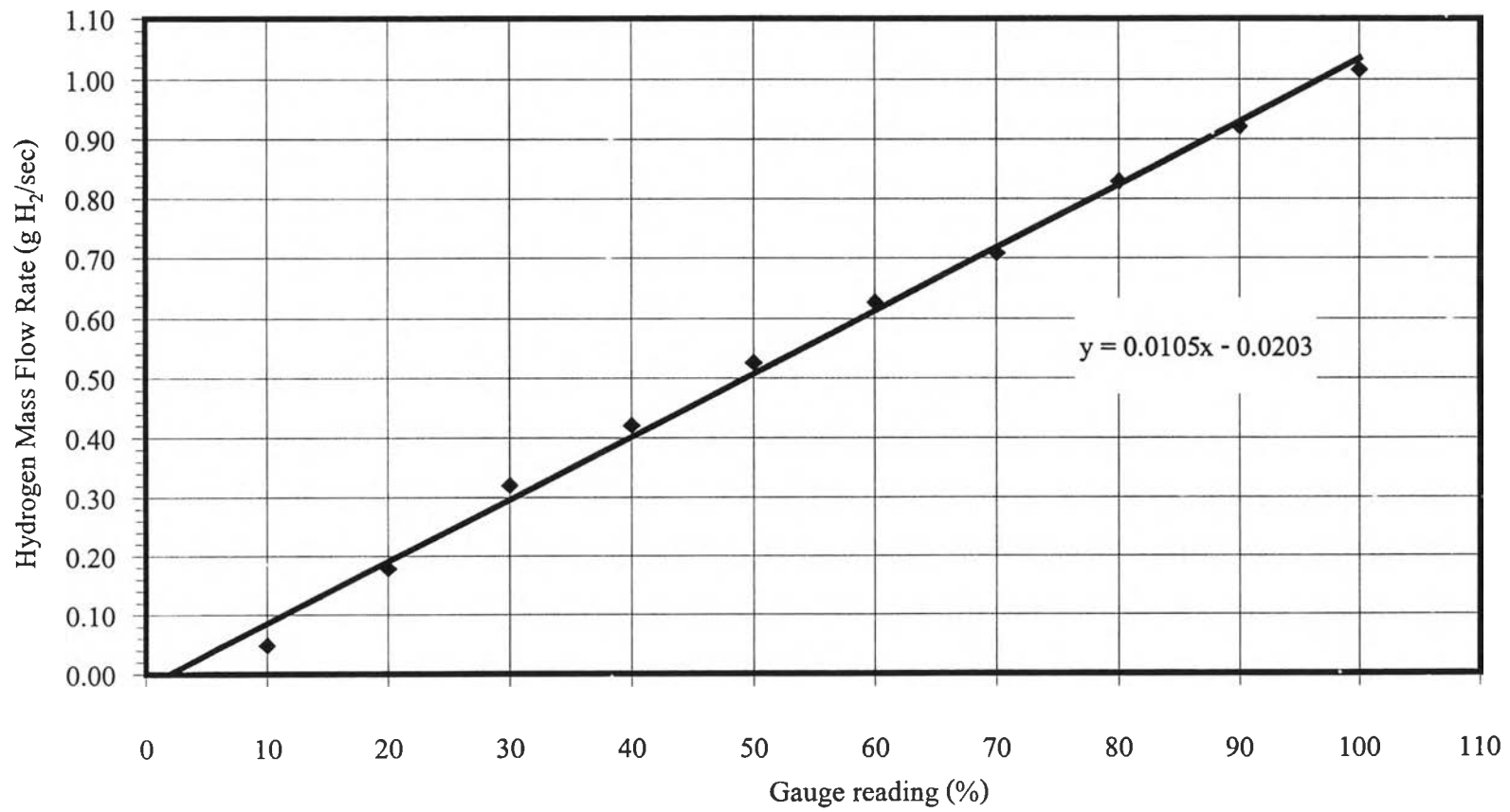
ชนิดของโลหะ	สมบัติที่ 300 K				λ (W/m.K) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (K)			
	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)	λ (W/m.K)	$\alpha \times 10^6$ (m ² /s)	400	600	800	1000
ดีบุก	7310	227	66.6	40.1	62.2	-	-	-
สังกะสี	7140	389	116	41.8	111	103	-	-
แมกนีเซียม	1740	1024	156	87.6	153	149	146	-
ซิลิคอน	2330	712	148	89.2	98.9	61.9	42.2	31.2
ไทเทเนียม	4500	522	21.9	9.32	20.4	19.4	19.7	20.7
ทังสเตน	19300	132	174	68.3	159	137	125	118

ตารางที่ จ-3 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซไฮโดรเจน [17]

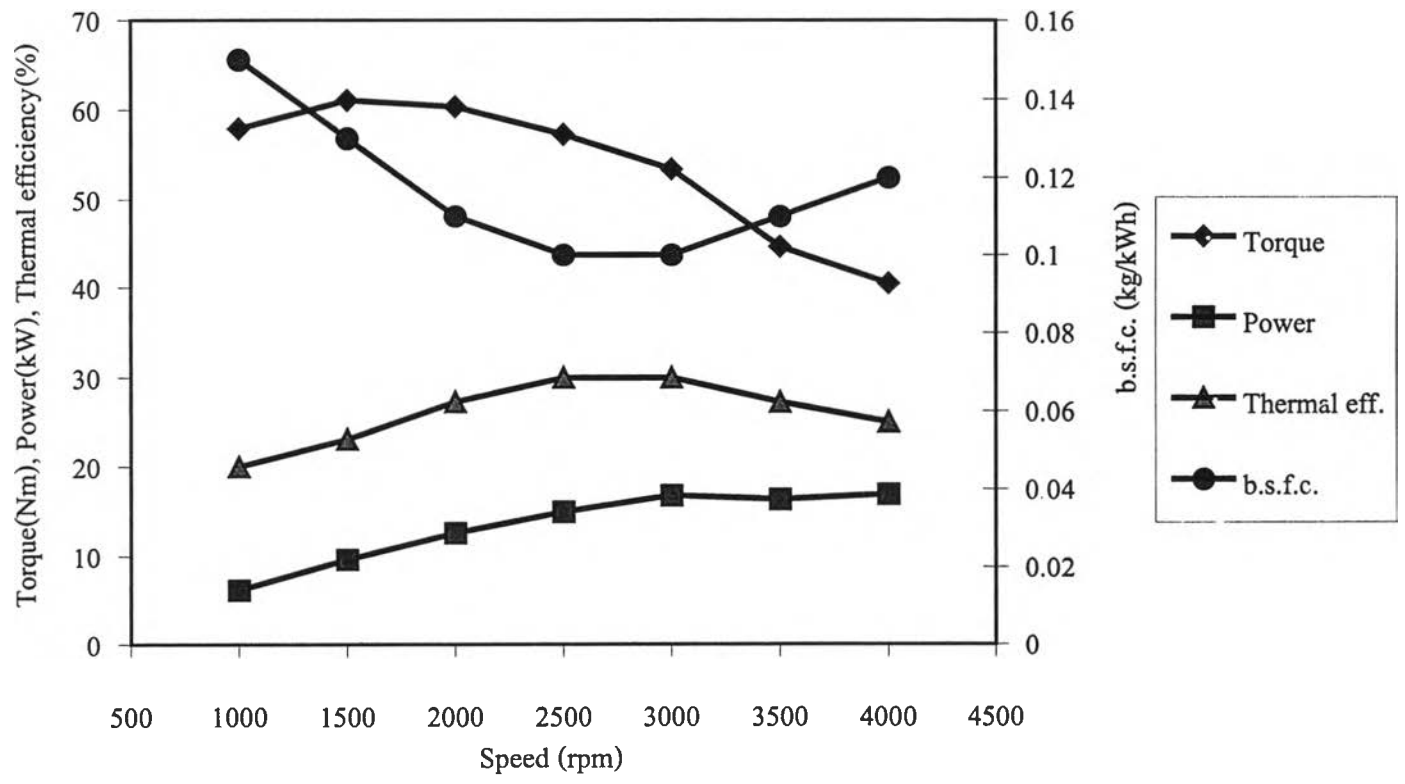
Description	Property
1. Electron Structure	S1
2. Covalent Radius	0.37A (He = 0.93A)
3. Electronegativity (Pauling)	2.1
4. Specific Heat	
C_p	3.44 Cal/Gram degK
C_v	2.46 Cal/Gram degK
C_p/C_v	1.40 Cal/Gram degK
5. Gas Density (0 °C, 1atm)	0.0899 Gram/Liter
6. Gas Specific Gravity	0.0695 Gram/Liter
7. Gas Self Diffusion Canst. (0 °C, 1atm)	0.61 CM ² /Sec
8. Bailing Point	252.7 C
9. Melting Point	259.2 C



รูปที่ ๑-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดอัตราการไหลแบบเข็มกับอัตราการไหลโดยปริมาตรของก๊าซไฮโดรเจน



รูปที่ ๑-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดอัตราการไหลแบบเข็มกับอัตราการไหลโดยมวลของก๊าซไฮโดรเจน



รูปที่ ๓-3 แสดงผลของสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวัชร สุขสะอาด เกิดเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2518 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2541 ปัจจุบันทำงานอยู่ที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย