

การศึกษากระบวนการเก็บและปล่อยก๊าซไฮโดรเจนจากถังเมทัลไฮไดรด์
สำหรับใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน



นายวัชร สุขสะอาด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-17-0011-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF CHARGE AND DISCHARGE PROCESS OF HYDROGEN FROM A METAL
HYDRIDE STORAGE FOR USING IN THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Mr. Watchara Sooksaard

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University


Academic Year 2001


ISBN 974-17-0011-3

วิษระ สุขสะอาด : การศึกษากระบวนการเก็บและปล่อยก๊าซไฮโดรเจนจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ สำหรับใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน (A STUDY OF CHARGE AND DISCHARGE PROCESS OF HYDROGEN FROM A METAL HYDRIDE STORAGE FOR USING IN THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE) : อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ฉัตรชัย หงษ์อุเทน : 151 หน้า : ISBN 974-17-0011-3.

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาเทคนิคการเก็บและใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ สำหรับใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยศึกษาถึงสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ ทั้งการเก็บและปล่อยก๊าซไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์ ทำการศึกษาสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ สำหรับการปล่อยไฮโดรเจน ขณะเครื่องยนต์เดินเบา โดยเปรียบเทียบด้วยการเปลี่ยนอัตราการจ่ายไฮโดรเจน วัดความดัน เทียบกับเวลาที่ใช้ไฮโดรเจน และพิจารณาผลของอุณหภูมินำหล่อเย็นที่ไหลผ่านถังเมทัลไฮไดรด์ต่อการปล่อยก๊าซไฮโดรเจนออกจากถัง เมื่อควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ รวมทั้งศึกษาสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ สำหรับการบรรจุไฮโดรเจนด้วยการเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น เปลี่ยนอุณหภูมิของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ และเปลี่ยนอุณหภูมินำหล่อเย็นเทียบกับเวลาที่ใช้ในการบรรจุก๊าซไฮโดรเจนเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สำหรับการปล่อยไฮโดรเจนจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน นั่นคือที่อุณหภูมินำหล่อเย็นสูง เมทัลไฮไดรด์สามารถจับก๊าซไฮโดรเจนออกมาได้ปริมาณมาก ความดันราบของเมทัลไฮไดรด์สูงตามด้วย ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์สูงเวลาที่ใช้จับไฮโดรเจนออกมาใช้ในการเดินเครื่องจะลดต่ำลง และการบรรจุไฮโดรเจนเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นทำให้ใช้เวลาสั้นลงในการบรรจุไฮโดรเจนลงถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ขณะที่อุณหภูมิของถังมีอุณหภูมิสูง จะใช้เวลาในการบรรจุมากด้วย ซึ่งสามารถใช้กับรถยนต์ไฮโดรเจนแบบเมทัลไฮไดรด์กับสภาพการทำงานจริงได้

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต 

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ปีการศึกษา 2544



4170510421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD : METAL HYDRIDE/HYDROGEN STORAGE/PCI/HYDRALLOY/ HYDRIDE

WATCHARA SOOKSAARD : A STUDY OF CHARGE AND DISCHARGE PROCESS OF HYDROGEN FROM A METAL HYDRIDE STORAGE FOR USING IN THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. CHATCHAI HONGUTEN, M. Eng. 151 pp. ISBN 974-17-0011-3.

This is an experiment, which aimed to study the techniques behind the charge and discharge process of hydrogen from a metal hydride storage that is used in the internal combustion engine. This study determines the efficiency of metal hydride tank by using hydrogen with purity. The experiment is performed to investigate the efficiency of metal hydride tank in dehydride when engine is in idle condition by comparing the discharging rate of hydrogen against the gas flow rate. The pressure is measured with time of using hydrogen in order to determine the effect of cooling water temperature on the rate of discharging when the engine is controlled to be running at a constant speed. Inclusive study of efficacious metal hydride tank in charge hydrogen when change cooling flow rate, change metal hydride tank temperature and change cooling temperature compare to the time in charge hydrogen into metal hydride tank.

The experimental results indicate that the process of discharging hydrogen from metal hydride tank is an endothermic reaction. This reaction means that when cooling water with high temperature passes through the tank, it dehydride resulting in high volumetric hydrogen and high plateau pressure of metal hydride. At a high engine speed, the time taken to discharge hydrogen process for use in running the engine decreases. The process of charging hydrogen into the metal hydride tank is an exothermic reaction. At a high cooling water flow rate, the time taken to charge hydrogen is less than at a low cooling water flow rate. When the tank temperature is high, the time taken in charging process will be high as well. Moreover, the metal hydride tank can be applicable to car in the city very well.

Department.....Mechanical Engineering..... Student's signature..........
 Field of study.....Mechanical Engineering..... Advisor's signature..........
 Academic year2001.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากรองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ขงเจริญ ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนด้านอุปกรณ์ถึงเก็บเมทิลไฮโดรด์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฉัตรชัย หงษ์อุเทน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งอาจารย์ทั้งสองท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิจัย นอกจากอาจารย์ทั้งสองท่านแล้ว

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนวิจัยที่ได้รับจากงบประมาณแผ่นดิน ขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติที่ให้ทุนสนับสนุนวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งสนับสนุนสถานที่ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งผู้ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยซึ่งประกอบด้วย ครูสุรารุช อาปนกะพันธ์, ครูสนิท บรอฮิมี่, คุณณอม อุดม, คุณธนาวี กิริธาพล, คุณอลงกรณ์ โชคชัยวรกุล, คุณชนะศักดิ์ ศรีพฤชา และเจ้าหน้าที่จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครูอาจารย์ทุกท่าน ซึ่งได้อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา ขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งให้โอกาสผู้วิจัยได้ศึกษาเล่าเรียนจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ณ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฉ
คำอธิบาย	ณ
บทที่	
1. บทนำ	1
2. การผลิตและการจัดเก็บก๊าซไฮโดรเจน	6
2.1 ขบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน	6
2.2 การจัดเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน	8
2.3 ตัวอย่างการจัดเก็บด้วยวิธีทางฟิสิกส์	10
2.4 ตัวอย่างการจัดเก็บด้วยวิธีทางเคมี	12
3. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเมทัลไฮไดรด์	17
3.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับแผนภาพ PCI	19
3.2 มุมมองทางเทคนิคเกี่ยวกับเมทัลไฮไดรด์	23
3.3 การแบ่งชนิดของเมทัลไฮไดรด์	23
3.4 ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของเมทัลไฮไดรด์	28
3.5 ผลของก๊าซเจือปนในไฮโดรเจนต่อเมทัลไฮไดรด์	29
3.6 การพัฒนากระบวนการ Selective absorption	35
3.7 การนำความร้อนของเมทัลไฮไดรด์	35
3.8 มุมมองด้านความปลอดภัยของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์	42
3.9 การผลิตเมทัลไฮไดรด์และถังเก็บเมทัลไฮไดรด์	46
4. การใช้งานในรถยนต์	49
4.1 เครื่องยนต์สันดาปภายในใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจน	49
4.2 เครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้ทั้งไฮโดรเจนและเบนซิน (ใช้เชื้อเพลิง 2 ชนิด)	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 เทคโนโลยีของถังเมทัลไฮไดรด์ในรถยนต์	51
4.4 เทคโนโลยีระบบถังเก็บแบบเมทัลไฮไดรด์	55
4.5 ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์แบบมีการถ่ายเทความร้อนภายนอกถังเก็บ	56
4.6 ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์แบบมีการถ่ายเทความร้อนภายในถังเก็บ	58
5. การติดตั้งระบบเชื้อเพลิงไฮโดรเจน	61
6. การทดสอบสมรรถนะถังเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบเมทัลไฮไดรด์	70
7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	102
รายการอ้างอิง	106
ภาคผนวก	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	151

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
1.1 แสดงการเปรียบเทียบของรถยนต์ระบบเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน	2
2.1 แสดงค่าความร้อนต่ำสุดของไฮโดรเจน	9
2.2 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของไฮโดรเจน	15
3.1 คุณสมบัติของโลหะผสมบางชนิด	34
3.2 ความสามารถในการนำความร้อนของ TiFe, Mg ₂ Ni และไฮโดรเจน	36
3.3 ความสามารถในการนำความร้อนสำหรับโลหะชนิดต่างๆ	37
3.4 ความสามารถในการนำความร้อนของ TiFe กับโลหะที่เติมเพื่อเพิ่มความสามารถในการนำความร้อน ซึ่งถูกอัดด้วยความดัน 2.8 kbar	37
4.1 ข้อมูลของถังเก็บเมทัลไฮโดรเจน (200 kg TiFe-Alloy)	58
ก-1 แสดงผลการทดสอบกับระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที	109
ก-2 แสดงผลการทดสอบกับระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที	110
ก-3 แสดงผลการทดสอบกับระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที	111
ก-4 แสดงผลการทดสอบกับระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที	112
ก-5 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรเจน ขณะปล่อยไฮโดรเจนที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮโดรเจน 32 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที	113
ก-6 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรเจน ขณะปล่อยไฮโดรเจนที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮโดรเจน 32 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที	114

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้าที่
ก-7	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจนที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที	115
ก-8	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจนที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที	116
ก-9	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจนที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 50 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที	117
ก-10	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจนที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 50 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที	118
ก-11	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจนที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 50 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที	119
ก-12	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจนที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 50 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที	120
ก-13	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจนที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 70 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที	121
ก-14	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 °C อัตราการไหลของน้ำ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	122
ก-15	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 °C อัตราการไหลของน้ำ 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	123

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก-16	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้า ถังเมทัลไฮโดรด์ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัล ไฮโดรด์ 32 °C อัตราการไหลของน้ำ 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	12
ก-17	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้า ถังเมทัลไฮโดรด์ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัล ไฮโดรด์ 32 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	12
ก-18	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้า ถังเมทัลไฮโดรด์ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัล ไฮโดรด์ 32 °C อุณหภูมิถึง 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.0 ลูกบาศก์ เมตรต่อชั่วโมง	12
ก-19	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้า ถังเมทัลไฮโดรด์ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเมทัล ไฮโดรด์ 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	12
ก-20	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจนเมื่อ ต่อเข้ากับหม้อน้ำในรถยนต์ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C เครื่องยนต์เดิน เบาที่ 1,200 รอบต่อนาที	12
ก-21	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจนเมื่อ ต่อเข้ากับหม้อน้ำในรถยนต์ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C เครื่องยนต์เดิน เบาที่ 1,700 รอบต่อนาที	12
ก-22	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจนเมื่อ ต่อเข้ากับหม้อน้ำในรถยนต์ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C เครื่องยนต์เดิน เบาที่ 2,000 รอบต่อนาที	13
ก-23	ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจนเมื่อ ต่อเข้ากับหม้อน้ำในรถยนต์ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34 °C เครื่องยนต์เดิน เบาที่ 2,500 รอบต่อนาที	13

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-1	Alloy types for GfE Hydralloy [®] hydrogen storage alloys	13
จ-1	สมบัติของธาตุต่างๆ	14
จ-2	สมบัติทางฟิสิกส์และความร้อนของโลหะ (ของแข็ง)	14
จ-3	คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซไฮโดรเจน	14

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้าที่
2.1	แสดงการจัดเก็บไฮโดรเจนในรูปแบบต่างๆ	8
3.1	แผนภาพ PCI (Pressure-Composition-Isotherm diagram)	17
3.2	แผนภาพแสดงการเข้าแทรกตัวของโมเลกุลไฮโดรเจนในเนื้อโลหะ	19
3.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิของ van't Hoff-Isochoren	21
3.4	แผนภาพ PCI แสดงความเป็นเนื้อเดียวกัน (ความบริสุทธิ์) ของโลหะผสม	22
3.5	แสดงชนิดของเมทัลไฮไดรด์	24
3.6	ผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับพลังงานความร้อน	27
3.7	ผลจากการกระตุ้น Lavesphasenhydride (ตัวอย่างเช่น TiZrCrMn) และ TiFe-Hydride	31
3.8	ภาพที่ได้จากการขัดผิว สีเข้มเป็นไฮไดรด์ที่ถูกอัดแน่น ส่วนสีอ่อนเป็นอะลูมิเนียม 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งแขนงของอะลูมิเนียมจะบอกถึงความสามารถในการนำความร้อนได้ดี	39
3.9	ภาพของถังเมทัลไฮไดรด์	39
3.10	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดความสามารถในการนำความร้อน	40
3.11	ค่าการนำความร้อนของ TiFe โดยมีส่วนผสมของอะลูมิเนียมที่ความดันอัดแน่น	41
3.12	ภาพแสดงผลการยิงทดสอบถัง TiFe-Hydride	43
3.13	ภาพแสดงผลการยิงทดสอบถังเบนซีน	44
3.14	อุณหภูมิติดไฟด้วยตัวเองของ TiFe-Hydride ที่อัดแน่น (+ 5% Al) และไม่ได้อัดแน่น	45
3.15	อุณหภูมิติดไฟด้วยตัวเองของ TiZrCrMn-Hydride (+ 5% Al) ในสภาวะอัดแน่น	45
3.16	กราฟแสดงความดันภายในถัง TiFe-Hydride ที่ได้รับพลังงานความร้อนจากภายนอก (การลุกไหม้ของเบนซีน)	46
3.17	แผนผังการผลิตถังเมทัลไฮไดรด์	47
3.18	การเติมโลหะผสมในถังรูปกระบอก	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้าที่
4.1	ถังเก็บเมทลไฮโดรด์แบบอยู่กับที่ โดยใช้ระบบถ่ายเทความร้อนภายใน ปริมาณโลหะผสมประมาณ 2 ตัน	52
4.2	ภาพแสดงอุปกรณ์สำหรับระบบถ่ายเทความร้อนภายในถังเมทลไฮโดรด์ ภาพล่างเป็นเมทลไฮโดรด์	52
4.3	ถังเมทลไฮโดรด์ในรูปประกอบด้วยท่อขนาดเล็กจำนวนมาก การแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้นที่ภายนอก ผ่านผิวของท่อเล็กๆ	53
4.4	แสดงถังเมทลไฮโดรด์ (ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนแบบภายนอก สำหรับ น้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนในรูปอาจ เปลี่ยนเป็นก๊าซร้อนจากท่อไอเสีย หรือ ไอเสียก็ได้)	54
4.5	ผังแสดงชุดทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับถังเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน..	55
4.6	ถังเมทลไฮโดรด์ถังแรกของ Daimler-Benz	56
4.7	ถังเมทลไฮโดรด์ในอ่างน้ำ ซึ่งติดตั้งอยู่ในรถ	57
4.8	ผังแสดงถังเมทลไฮโดรด์ แบบมีระบบถ่ายเทความร้อนภายใน	58
4.9	ภาพแสดงการติดตั้งถังเมทลไฮโดรด์ แบบมีระบบถ่ายเทความร้อนภายในติดตั้งในรถยนต์ (ใต้เบาะ)	58
4.10	รูปของโครงสร้างของ metal hydride storage	59
4.11	Different designs of GfE metal hydride storage containers	60
5.1	แสดงถังเมทลไฮโดรด์ KW 5	66
5.2	แสดงถึงความดันสูง	66
5.3	แสดงลิ้นป้องกัน (Ball Valve)	67
5.4	แสดงท่อส่งก๊าซ, ข้อต่อ, ลิ้นโซลินอยด์, มิเตอร์วัดอัตราการไหลของก๊าซ ไฮโดรเจน	67
5.5	แสดงลิ้นควบคุมการจ่ายก๊าซไฮโดรเจน (Needle Valve)	68
5.6	แสดงการควบคุมแรงดัน (Pressure regulator) ขณะเก็บและปล่อยก๊าซ ไฮโดรเจนจากถังเมทลไฮโดรด์	68
5.7	แสดงการติดตั้งระบบจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบเมทลไฮโดรด์	69

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้าที่
6.i	แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิและเครื่องวัดอัตราการไหลสำหรับเครื่องยนต์ไฮโดรเจน	81
6.2	แสดงอุปกรณ์ทดสอบหาสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ทั้งเก็บและปล่อยก๊าซไฮโดรเจน	82
6.3	แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าหม้อน้ำ ขณะติดตั้งบนเครื่องยนต์	83
6.4	แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์	83
6.5	แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน	84
6.6	แสดงอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซไฮโดรเจน	84
6.7	แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิขาเข้า-ขาออกจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์	85
6.8	แสดงเกจวัดความดันขาออกจากถังเมทัลไฮไดรด์ และ Pressure Regulator	85
6.9	แสดงระบบระบายความร้อนของถังเมทัลไฮไดรด์	86
6.10	แสดงเครื่องควบคุมความร้อน (Control Heat System)	86
6.11	แสดงตำแหน่งการติดตั้งเมทัลไฮไดรด์กับเครื่องยนต์	87
6.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์ อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าและปริมาณความร้อนที่ระบายออกจากหม้อน้ำกับเวลา ขณะเครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที	88
6.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์ อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าและปริมาณความร้อนที่ระบายออกจากหม้อน้ำกับเวลา ขณะเครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที	89
6.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์ อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าและปริมาณความร้อนที่ระบายออกจากหม้อน้ำกับเวลา ขณะเครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้าที่
6.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์ อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าและปริมาณความร้อนที่ระบายออกจากหม้อน้ำกับเวลา ขณะเครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที	91
6.16	แสดงความสัมพันธ์ความดันของก๊าซไฮโดรเจนออกจากถังเมทัลไฮโดรด์กับเวลา ขณะนำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮโดรด์ 32 องศาเซลเซียส	92
6.17	แสดงความสัมพันธ์ความดันของก๊าซไฮโดรเจนออกจากถังเมทัลไฮโดรด์กับเวลา ขณะนำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮโดรด์ 50 องศาเซลเซียส	93
6.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันของก๊าซไฮโดรเจนออกจากถังเมทัลไฮโดรด์กับเวลา ขณะนำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที	94
6.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนที่บรรจุเข้าถังเมทัลไฮโดรด์กับเวลาที่ใช้ในการบรรจุไฮโดรเจน (charge) เข้าถัง อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮโดรด์เท่ากับ 32 องศาเซลเซียส	95
6.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนที่บรรจุเข้าถังเมทัลไฮโดรด์กับเวลาที่ใช้ในการบรรจุไฮโดรเจน (charge) เข้าถัง ด้วยอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮโดรด์เท่ากับ 3.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	96
6.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนที่บรรจุเข้าถังเมทัลไฮโดรด์กับเวลาที่ใช้ในการบรรจุไฮโดรเจน (charge) เข้าถัง ด้วยอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮโดรด์เท่ากับ 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	97
6.22	แสดงสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮโดรด์ ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนเมื่อถึงได้รับความร้อนจากน้ำร้อนหม้อน้ำในเครื่องยนต์กับเวลาที่นำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ขณะเครื่องเดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที ..	98

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้าที่
6.23	แสดงสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮโดรด์ ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจน เมื่อถึงได้รับความร้อนจากน้ำร้อนหม้อน้ำในเครื่องยนต์กับเวลาที่นำ ไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ขณะเครื่องเดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที ..	99
6.24	แสดงสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮโดรด์ ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจน เมื่อถึงได้รับความร้อนจากน้ำร้อนหม้อน้ำในเครื่องยนต์กับเวลาที่นำ ไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ขณะเครื่องเดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที ..	100
6.25	แสดงสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮโดรด์ ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจน เมื่อถึงได้รับความร้อนจากน้ำร้อนหม้อน้ำในเครื่องยนต์กับเวลาที่นำ ไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ขณะเครื่องเดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที ..	101
ข-1	การคาย (Desorption) ที่ 20 °C	135
ข-2	การคาย (Desorption) ที่ 45 °C	135
ข-3	แสดงถังเก็บเมทัลไฮโดรด์ KW5	136
ค-1	แสดงขั้นตอนการเติมและการใช้งานถังเก็บเมทัลไฮโดรด์ KW5	139
ง-1	แสดงสารละลายของแข็งแบบแทนที่ วงกลมสีเข้มกับสีขาวแสดง อะตอมของธาตุต่างชนิดกัน	141
ง-2	แสดงสารละลายของแข็งแบบสอดแทรกของคาร์บอนในเหล็ก	142
ฉ-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดอัตราการ ไหลแบบเข็มกับอัตราการไหลโดยปริมาตรของก๊าซไฮโดรเจน	148
ฉ-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดอัตราการ ไหลแบบเข็มกับอัตราการไหลโดยมวลของก๊าซไฮโดรเจน	149
ฉ-3	แสดงผลของสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็น เชื้อเพลิง	150

คำอธิบายสัญลักษณ์

P_{H_2}	=	ความดันแตกตัวของไฮโดรเจน
ΔS	=	การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีขณะที่เกิดเมทัลไฮไดรด์
ΔH	=	เอนทาลปีของการเกิดเมทัลไฮไดรด์
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ
T	=	อุณหภูมิ
L_{H_2}	=	อัตราการเกิดสารละลายของก๊าซไฮโดรเจนในเมทัลไฮไดรด์
P	=	จำนวนเฟสที่อยู่ด้วยกันได้ในระบบปิด
C	=	จำนวนองค์ประกอบ (component) ในระบบ
F	=	ระดับขั้นความเสรี (degree of freedom)
t	=	เวลาที่ใช้ในการเก็บและนำมาใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากถังเมทัลไฮไดรด์
$Temp_{in}$	=	อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์
$Temp_{out}$	=	อุณหภูมิของน้ำออกจากถังเมทัลไฮไดรด์
ΔT	=	ผลต่างของอุณหภูมิเข้า-ออกจากถังเมทัลไฮไดรด์
P_{out}	=	ความดันที่เมทัลไฮไดรด์ผลิตออกมา
λ	=	ค่าการนำความร้อนของไฮโดรเจน