การพัฒนาการดัดแปลงใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับยานพาหนะ

เสนอต่อ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

โดย

สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนงานวิจัยโดยงบประมาณแผ่นดิน
ปีงบประมาณ พ.ศ.2543

ห้องสมุด สถาบันวิจัยพลังงาน
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

B 16277831
I 20389281

การพัฒนาการดัดแปลงใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับยานพาหนะ

เสนอต่อ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

โดย

สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนงานวิจัยโดยงบประมาณแผ่นดิน
ปีงบประมาณ พ.ศ.2543

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่ FRI 631.302 9683 พ
เลขทะเบียน 43001
วัน.....เดือน.....ปี 43

คำนำ

สถาบันวิจัยพลังงาน ได้รับความเห็นชอบจากสำนักคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและสำนักงบประมาณ ในการพิจารณาจัดสรรงบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ 2543 ให้ดำเนินการวิจัยโครงการวิจัยเรื่อง "การพัฒนาการดัดแปลงใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับยานพาหนะ" งบประมาณที่ได้รับ 800,000 บาท โดยมี อาจารย์ฉัตรชัย หงษ์อุเทน เป็นนักวิจัยหลัก

บัดนี้โครงการวิจัยดังกล่าวได้ดำเนินการเสร็จเรียบร้อยแล้ว สถาบันวิจัยพลังงานขอขอบคุณผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่กรุณาช่วยให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และหวังว่าโครงการนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจสืบไป

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)
ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยพลังงาน
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
22 มกราคม 2546

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะผู้ดำเนินงานวิจัย

1.รองศาสตราจารย์ ดร.กุลธร ศิลปบรรเลง	ที่ปรึกษาโครงการ
2.รองศาสตราจารย์ ดำรงศักดิ์ มะลิลา	ที่ปรึกษาโครงการ
3.รองศาสตราจารย์ วิทยา ยงเจริญ	หัวหน้าโครงการและผู้อำนวยการสถาบันฯ
4.ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรชัย หงษ์อุเทน	นักวิจัยหลักของโครงการ
5.นางสาวพัชรี ชิ้มเจริญ	เจ้าหน้าที่วิจัยและเลขานุการโครงการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อ		-
สารบัญ		-
บทที่ 1	**ความเป็นมาของโครงการ**	1
	1.1 บทนำ	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
	1.3 เป้าหมายของงานวิจัย	2
บทที่ 2	**ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการจัดเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน**	3
	2.1 ตัวอย่างการจัดเก็บด้วยวิธีทางฟิสิกส์	5
	2.1.1 การเก็บในถังความดันสูง	5
	2.1.2 การเก็บในลูกแก้ว	5
	2.1.3 การเก็บในรูปความดันต่ำ การเก็บในรูปไฮโดรเจน	5
	2.1.4 Cryogenic Adsorption	6
	2.2 ตัวอย่างการจัดเก็บด้วยวิธีทางเคมี	6
	2.2.1 การเก็บไฮโดรเจนในรูปแอมโมเนีย	6
	2.2.2 การเก็บในรูปน้ำ	7
	2.2.3 การเก็บในรูปเมทัลไฮไดรด์ (ปฏิกิริยาย้อนกลับได้)	8
บทที่ 3	**ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเมทัลไฮไดรด์**	10
	3.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับแผนภาพ PCI	11
	3.2 มุมมองทางเทคนิคเกี่ยวกับเมทัลไฮไดรด์	15
	3.3 การแบ่งชนิดของเมทัลไฮไดรด์	15
	3.3.1 เมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำ	16
	3.3.2 เมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานปานกลาง	16
	3.3.2 เมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูง	17
	3.4 ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของเมทัลไฮไดรด์	17
	3.5 ผลของแก๊ซเจือปนในไฮโดรเจนต่อเมทัลไฮไดรด์	19
	3.5.1 การกระตุ้นโลหะผสมให้กลับมา Active	19
	3.5.2 ผลของการปนเปื้อน	21
	3.5.2.1 ผลของการเกาะตัวทางฟิสิกส์ (Adsorption)	21
	3.5.2.2 ผลของการเกาะตัวทางเคมี (Chemisorption)	21

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	3.6 การนำความร้อนของเทมัลไฮไดรด์	22
	3.7 มุมมองด้านความปลอดภัยของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์	28
	3.8 ขั้นตอนการผลิตเมทัลไฮไดรด์และถังเมทัลไฮไดรด์	35
บทที่ 4	**การใช้งานในรถยนต์**	37
	4.1 เครื่องยนต์สันดาปภายในใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจน	37
	4.2 เครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้กับไฮโดรเจนและเบนซิน (ใช้เชื้อเพลิง 2 ชนิด)	38
	4.3 เทคโนโลยีของถังเมทัลไฮไดรด์ในรถยนต์	39
	4.3.1 ถังเก็บแบบเมทัลไฮไดรด์ของ Daimler-Benz	42
	4.3.1.1 ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์แบบมีการถ่ายเทความร้อนภายนอกถังเก็บ	45
	4.3.1.2 ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์แบบมีการถ่ายเทความร้อนภายในถังเก็บ	48
	4.4 เทคนิคการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนในถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำ	50
บทที่ 5	**ถังเมทัลไฮไดรด์ KW5**	54
	5.1 ข้อมูลจำเพาะทางเทคนิค	54
	5.2 การติดตั้งถังเมทัลไฮไดรด์ KW5	55
	5.2.1 การออกแบบระบบเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของถังเมทัลไฮไดรด์ KW5	56
	5.2.2 การออกแบบระบบน้ำหล่อเย็นของถังเมทัลไฮไดรด์ KW5	59
	5.2.3 ขั้นตอนการใช้งานของระบบเชื้อเพลิงและระบบน้ำหล่อเย็น	60
บทที่ 6	**การทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบเมทัลไฮไดรด์**	62
บทที่ 7	**การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบสมรรถนะของเมทัลไฮไดรด์**	66
ภาคผนวก ก.	ภาพถ่าย	-
ภาคผนวก ข.	ผังแสดงอุปกรณ์	-
ภาคผนวก ค.	กราฟที่ได้จากการทดสอบ	-
ภาคผนวก ง.	ตารางผลการทดสอบ	-
เอกสารอ้างอิง		-

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยประยุกต์มีวัตถุประสงค์เพื่อดัดแปลงใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับยานพาหนะ โดยเน้นด้านความปลอดภัยของการใช้ถังบรรจุเชื้อเพลิงไฮโดรเจน จากการศึกษาถึงวิธีการจัดเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนพบว่าการเก็บในรูปเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำมีความปลอดภัยสูงจึงได้เลือกใช้ถังเมทัลไฮไดรด์ ในงานวิจัยนี้ การทดสอบสมรรถนะของถังจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนโดยในขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบคุณสมบัติในการอัดบรรจุและการจ่ายของถังเพื่อใช้ในการวางระบบเชื้อเพลิงและระบบน้ำหล่อเย็นของถัง ในขั้นตอนที่สองจะเป็นการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ขณะใช้กับรถไฮโดรเจน ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าถังเมทัลไฮไดรด์ สามารถใช้กับรถไฮโดรเจนได้เป็นอย่างดี สามารถจ่ายเชื้อเพลิงให้แก่เครื่องยนต์ได้เมื่อเริ่มออกตัวในขณะที่เครื่องยนต์และน้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้องและขณะวิ่งที่ภาระต่างๆ เนื่องจากน้ำหล่อเย็นเครื่องยนต์มีอุณหภูมิสูงขึ้น การจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจึงเป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง การบรรจุเชื้อเพลิงใช้เวลาประมาณ 10-20 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ยอมรับได้ ถังเมทัลไฮไดรด์จะมีขนาดเล็กกว่าถังแบบความดันสูงแต่มีน้ำหนักจะใกล้เคียงกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Abstract

The objective of this applied research is to modifying a vehicle to be used with hydrogen as a fuel. The emphasis of the study is to design a large scale safes, and practical fuel storage tank for the hydrogen. It is found from this study that the metal hydride is the safest material to be used. There are two stages in this study. The first stage is an experimentation of charging and discharging the hydrogen from the tank to supporting the design of the fuel and water cooling system. In the second stage, the testing was done on the vehicle at various loads. The result can be concluded as the following : the metal hydride tank is potentially most effective with vehicle using hydrogen as a fuel. It can release Hydrogen to engine when being started while the temperature of both the engine and the cooling water are at room temperature. In addition it can release Hydrogen well when the engine run at the various loads. As the cooling water is heated up the Hydrogen release can be done continuously. The charging time of the metal hydride tank takes up approximately 10-20 minutes which is in the acceptable range of time. Although the metal hydrid tank is rather small in comparison to normal high pressure tank, but its weight is comparatively not too much different.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถังเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบเมทัลไฮไดรด์ (Metal Hydride Hydrogen Fuel Tank)

หน้า
บทที่ 1
ความเป็นมาของโครงการ

1.1 บทนำ

โครงการนี้เป็นวิจัยต่อเนื่องในระยะที่ 3 ซึ่งต่อเนื่องมาจากโครงการแรกคือ "การศึกษาการใช้พลังงานไฮโดรเจน" ในโครงการนี้ได้ทำการศึกษาและดัดแปลงเครื่องยนต์เบนซินให้สามารถใช้กับเชื้อเพลิงไฮโดรเจน ส่วนโครงการที่สองคือ "การศึกษาการดัดแปลงใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับยานพาหนะ" โดยในโครงการที่สองนี้ได้นำผลจากโครงการแรกคือเครื่องยนต์ไฮโดรเจนติดตั้งลงในรถ Mazda Familiar ได้เป็นผลสำเร็จ และได้ทดสอบสมรรถนะของรถเป็นที่น่าพอใจในระดับหนึ่ง แต่ได้พบว่าถังเชื้อเพลิงที่เป็นถังความดันสูงนั้นยังมีความปลอดภัยน้อย และสามารถก่อให้เกิดอุบัติเหตุที่ร้ายแรงได้ ในโครงการนี้จึงได้ศึกษาและได้พัฒนาระบบถังเชื้อเพลิงให้มีความปลอดภัยเทียบเท่ากับถังเชื้อเพลิงเบนซินในปัจจุบัน ผลจากการศึกษาพบว่าถังบรรจุเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบเมทัลไฮไดรด์สามารถนำมาใช้กับรถยนต์ได้อย่างปลอดภัยจึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาระบบเชื้อเพลิงของรถไฮโดรเงนอีกครั้งโดยติดตั้งถังเมทัลไฮไดรด์ลงในรถไฮโดรเจนเดิม ผลจากการทดลองพบว่าระบบเชื้อเพลิงนี้สามารถใช้งานได้อย่างสมบูรณ์โดยสามารถเริ่มขับเคลื่อนได้จากขณะที่เครื่องเย็นและเมื่อขับที่ภาระสูงก็ยังคงจ่ายเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่อง แสดงถึงการวางระบบเชื้อเพลิงและระบบน้ำหล่อเย็นของถังเมทัลไฮไดรด์เป็นไปอย่างถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยประยุกต์ และเป็นการวิจัยต่อเนื่องในระยะที่ 3 โดยมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. ติดตามความก้าวหน้าของการวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับพลังงานไฮโดรเจน
2. ศึกษาและติดตามการพัฒนาการนำพลังงานไฮโดรเจนมาใช้กับยานพาหนะ
3. ศึกษาวิจัยและพัฒนารถยนต์ไฮโดรเจนให้มีสมรรถนะในการขับขี่ดีขึ้น

โดยงานวิจัยนี้จะเน้นการพัฒนารถยนต์ไฮโดรเจนในด้านความปลอดภัยของระบบจัดเก็บเชื้อเพลิง โดยเปลี่ยนจากถังความดันสูงมาเป็นถังเมทัลไฮไดรด์ ซึ่งถังเมทัลไฮไดรด์นั้น เนื่องจากการเก็บในรูปเคมี ซึ่งไฮโดรเจนจะเก็บอยู่ในรูปของเมทัลไฮไดรด์ การนำเชื้อเพลิงออกมาใช้งานและการบรรจุ

จะเป็นปฏิกิริยาที่ให้และคายความร้อน จึงต้องวางระบบถ่ายเทความร้อน (ระบบน้ำหล่อเย็น) และระบบท่อเชื้อเพลิงให้ถูกต้องและเป็นการพัฒนารถยนต์ไฮโดรเจนจากโครงการที่ผ่านมาให้ปลอดภัยยิ่งขึ้น

1.3 เป้าหมายของงานวิจัย

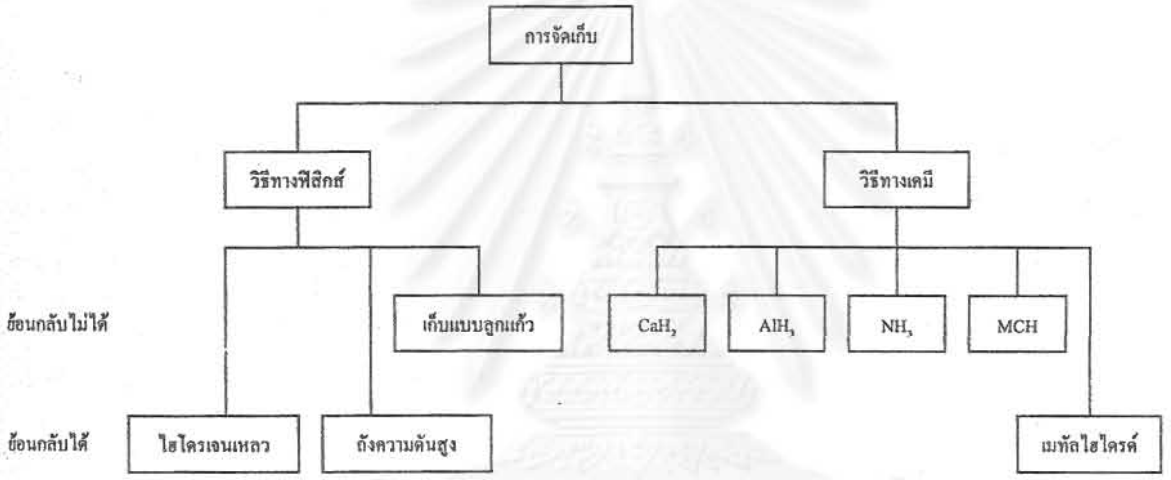
งานวิจัยนี้มีเป้าหมายหลักก็คือการติดตั้งถังเมทัลไฮไดรด์ลงในรถยนต์ไฮโดรเจนที่มีอยู่แล้ว การติดตั้งจะต้องมีการวางระบบของท่อเชื้อเพลิง และท่อน้ำหล่อเย็นซึ่งต้องอาศัยเทคนิคในการออกแบบและผลจากการทดสอบเบื้องต้นของถังเมทัลไฮไดรด์ เพื่อให้ถังเมทัลไฮไดรด์มีความสามารถที่จะจ่ายเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ทุกสภาวะของการขับเคลื่อน และสามารถบรรจุเชื้อเพลิงได้อย่างปลอดภัยและไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อถังเมทัลไฮไดรด์โดยใช้ระยะเวลาบรรจุที่เหมาะสม ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะใช้ในงานเผยแพร่เทคโนโลยีเชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับยานพาหนะในโครงงานต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการจัดเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นพาหะพลังงานหรือเชื้อเพลิงที่ใช้งานทั้งกับเครื่องต้นกำลังหรือเครื่องจักรที่ติดตั้งอยู่กับที่ (Stationary) เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในบ้านเพื่อผลิตไฟฟ้า ความร้อนและอื่นๆ และแบบเคลื่อนที่ได้ (Mobile) เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ ทั้งนี้ ปัญหาที่พบมากที่สุดในการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนคือ ปัญหาในเรื่องของการจัดเก็บ[1] กล่าวคือ วิธีการจัดเก็บไฮโดรเจนมิได้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักจำเพาะหรือปริมาตรจำเพาะของหน่วยเก็บพลังงานเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับราคา พฤติกรรมการใช้งาน ข้อจำกัดทางด้านอายุการใช้งาน ลักษณะโครงสร้างหรือการออกแบบ มุมมองด้านความปลอดภัย และความบริสุทธิ์ของเชื้อเพลิงอีกด้วย

การจัดเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีหลายวิธี ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การจัดเก็บไฮโดรเจนในรูปแบบต่าง ๆ

การจัดเก็บแบบย้อนกลับไม่ได้ คือ การจัดเก็บไฮโดรเจนโดยใช้กระบวนการหรือปฏิกิริยาทางเคมีที่สารตั้งต้นไม่สามารถคืนกลับไปสู่สภาพเดิมได้โดยอาศัยปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้ผู้ใช้ไม่สามารถบรรจุไฮโดรเจนใหม่หลังจากใช้งานแล้วได้ด้วยตนเอง แต่ต้องนำวัสดุที่ใช้จัดเก็บไปผ่านกระบวนการบรรจุใหม่ในโรงงาน ซึ่งต้องใช้กระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน

การจัดเก็บแบบย้อนกลับได้ คือ การจัดเก็บที่ใช้กระบวนการหรือปฏิกิริยาเคมีที่สารตั้งต้นสามารถกลับไปสู่สภาพเดิมได้โดยอาศัยปฏิกิริยาย้อนกลับที่ผู้ใช้สามารถบรรจุไฮโดรเจนใหม่ได้เองโดยไม่ต้องผ่านขบวนการจากโรงงาน

---

[1] การจัดเก็บไฮโดรเจนแต่ละวิธีจะมีปัญหาที่แตกต่างกันในเรื่องการผลิต, ความปลอดภัย หรือเงื่อนไขอื่นๆ การจัดเก็บแบบไฮโดรเจนเหลว ใช้พลังงานในการผลิตสูง ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ถ้าใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ จะมีการรั่วจากการระเหยได้ การจัดเก็บเป็นแก๊สไฮโดรเจนในถังความดัน จะไม่มีการรั่วของไฮโดรเจน แต่ถ้าถังได้รับการกระแทกแรงๆ อาจเกิดการระเบิดขึ้นได้

ในการเปรียบเทียบความสามารถในการจัดเก็บ จะพิจารณาจากน้ำหนักของไฮโดรเจนต่อน้ำหนักของหน่วยเก็บพลังงาน โดยในที่นี้จะพิจารณาเป็น %โดยน้ำหนักของไฮโดรเจนต่อน้ำหนักของหน่วยเก็บพลังงาน โดยที่ค่าความร้อนต่ำสุดของไฮโดรเจนมีค่า 120 MJ/kg ดังนั้น 1% โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่เก็บจะมีค่า 1.2 MJ/kgของถังเก็บ ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความร้อนที่เก็บต่อน้ำหนักของหน่วยเก็บพลังงาน[1]

%โดยน้ำหนักของไฮโดรเจน	MJ/kg	kg H_2/t
0.5	0.6	5
1	1.2	10
2	2.4	20
3	3.6	30
4	4.8	40
5	6.0	50

การพิจารณาพลังงานจำเพาะในรูป%โดยน้ำหนักสำหรับเทคนิคการจัดเก็บแบบเมทัลไฮไดรด์จะช่วยให้คำนวณความสามารถในการจัดเก็บได้โดยอาศัยรูปแบบสมการทางเคมี เช่น $LaNi_5H_6$ สามารถเก็บไฮโดรเจนได้ 6 อะตอม น้ำหนักของโลหะต่อสูตรทางเคมี 432.5 และคิดเป็น 1.4% โดยน้ำหนัก และบ่อยครั้งที่พบใน literature ปริมาณของไฮโดรเจนจะบอกเป็นเลขอัตราส่วนของจำนวนอะตอมไฮโดรเจนต่อจำนวนอะตอมของโลหะในสูตรทางเคมี

$LaNi_5H_6$: $\dfrac{\text{H 6 อะตอม}}{\text{La 1 อะตอม + Ni 5 อะตอม}} = 1$ ——————(2.1)

$TiFeH_2$: $\dfrac{\text{H 2 อะตอม}}{\text{Ti 1 อะตอม + Fe 1 อะตอม}} = 1$ ——————(2.2)

%โดยน้ำหนักของไฮโดรเจน

$$= \frac{\text{จำนวนอะตอมของ } H_2}{\text{น.น.อะตอมของโลหะ 1 x จำนวนอะตอมในสูตร + น.น.อะตอมของโลหะ 2 x จำนวนอะตอมในสูตร}} \quad \text{——————(2.3)}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1 ตัวอย่างการจัดเก็บด้วยวิธีทางฟิสิกส์

2.1.1 การเก็บในถังความดันสูง

โดยทั่วไป เก็บในท่อความดันสูง ปริมาตร 50 ลิตร ความดัน 200 bar และความหนาแน่น 16 g H_2 /l หรือ 16 kg/m^3
ท่อมีมวล 65 kg สามารถบรรจุไฮโดรเจนที่ 200 bar ได้ 8.9 m^3 คิดเป็น 795 g ดังนั้น ปริมาณที่บรรจุมีค่า 1.2% โดยน้ำหนัก ซึ่งถ้าใช้โลหะพิเศษ TiAl16V4 จะสามารถบรรจุได้ถึง 3.5% โดยน้ำหนัก

2.1.2 การเก็บในลูกแก้ว

วิธีนี้พัฒนาโดย Brookhaven National Laboratory (BNL) ใช้ลูกแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 – 100 ไมครอน หนาประมาณ 1 – 10 ไมครอน อาศัยหลักการของการแพร่ (diffusion) ของไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูง ผ่านผนังของลูกแก้ว ซึ่งลูกแก้วจะถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 300 – 400°C ที่ความดัน 400 – 500 bar แล้วให้ไฮโดรเจนแพร่ผ่านผนังของลูกแก้ว หลังจากทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 20°C ความเร็วในการแพร่ของไฮโดรเจนผ่านผนังลูกแก้วจะลดลง และความดันภายในลูกแก้วจะลดลงเหลือ 200 bar (เมื่อความดันภายนอกลูกแก้วลดลงที่ความดันบรรยากาศ) สามารถเก็บไฮโดรเจนได้ 4.6% โดยน้ำหนัก และคิดต่อปริมาตรเป็น 16 kg H_2/m^2 เท่ากับการเก็บในท่อความดันสูง เนื่องจากความดันภายในลูกแก้วกับบรรยากาศภายนอกมีความแตกต่างกันมาก ไฮโดรเจนจะสามารถแพร่หรือรั่วออกมาได้ หลังบรรจุจึงควรรีบนำมาใช้งาน

2.1.3 การเก็บในรูปความดันต่ำ , การเก็บในรูปไฮโดรเจนเหลว

ไฮโดรเจนเหลวใช้เป็นเชื้อเพลิงในยานอวกาศ มีความจุจำเพาะและคิดโดยปริมาตร 70 kg H_2/m^3 เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงเหลวทั่วไปเช่นเบนซินที่มีปริมาณของพลังงานเท่ากันถังเก็บไฮโดรเจนเหลวจะมีขนาดใหญ่กว่าถังเก็บเชื้อเพลิงเบนซินถึง 4 เท่า

ค่าความจุจำเพาะโดยมวลของถังเก็บพลังงานมิได้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำถังเก็บเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับมวลของฉนวน รูปทรงของถัง และมวลของอุปกรณ์เสริม เช่น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหรือปั๊ม ในกรณีที่พิจารณาถังเก็บเพียงอย่างเดียว ถ้าใช้ถังเหล็กบรรจุไฮโดรเจนจะมีขนาดเป็น 4 เท่าของถังบรรจุเบนซิน ถ้าใช้ถังอะลูมิเนียมจะมีขนาดเป็น 2 เท่าของถังบรรจุเบนซิน แต่การเก็บที่ 20 K ก็มีการสูญเสียไฮโดรเจนเนื่องจากการกลายเป็นไอของไฮโดรเจนเหลว

---

(1) ค่าความร้อนต่ำสุดของเบนซิน = 40 MJ/kg
ค่าพลังงานที่เก็บของแบตเตอรี่ทั่วไป (ตะกั่ว) = 0.1 MJ/kg

2.1.4 Cryogenic Adsorption

ในวิธีการนี้ โมเลกุลของไฮโดรเจน (ที่มีอุณหภูมิ 77° K) จะไปเกาะกับ (adsorb) คาร์บอนกัมมันต์ (activated carbon) คาร์บอนที่มีรูพรุน โดยหลักการแล้ววิธีนี้เปรียบเสมือนการรวมหลักการเก็บที่ความดันสูงกับการเก็บที่อุณหภูมิต่ำเข้าด้วยกัน ซึ่งวิธีการนี้จะเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในอนาคต ซึ่งการเก็บวิธีนี้จะไม่มีการรั่วของไฮโดรเจน

2.2 ตัวอย่างการจัดเก็บด้วยวิธีทางเคมี

2.2.1 การเก็บไฮโดรเจนในรูปแอมโมเนีย

$$2NH_3 \longrightarrow 3H_2 + N_2 \qquad (2.4)$$

ปฏิกิริยาตามสมการ(2.4) เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic reaction) มีการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปี $\Delta H = +31$ kJ/mol H_2 กล่าวคือ สารตั้งต้นมีเอนทาลปีต่ำกว่าสารผลิตผล ต้องใส่ความร้อนเพื่อให้ได้ไฮโดรเจนออกมา โดยกระบวนการแตกตัวนี้เกิดที่อุณหภูมิ 600°C ในอุปกรณ์แยกแก๊ส ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่านี้ การแตกตัวจะไม่สมบูรณ์และจะเกิดปฏิกริยาย้อนกลับ ทำให้ไฮโดรเจนกับไนโตรเจนรวมตัวเป็นแอมโมเนีย (NH_3) ตามเดิม

สำหรับอุปกรณ์เก็บแอมโมเนีย อุปกรณ์แยกแก๊ส และตัวฮีทเตอร์ มีข้อมูลดังต่อไปนี้

ถังเก็บแอมโมเนีย : ปริมาตรระบุ 40 ลิตร
น้ำหนักถัง 42 kg
น้ำหนักถังเมื่อบรรจุแอมโมเนีย 63 kg
ปริมาตรรวม 67 ลิตร

เมื่อแยกแอมโมเนียทั้งหมด 21 kg ออกมาเป็นแก๊ส จะได้แก๊สปริมาตร 55.3 m^3 ซึ่งประกอบด้วยไนโตรเจน 13.8 m^3 และไฮโดรเจน 41.5 m^3

อุปกรณ์แยกแก๊ส : น้ำหนักพร้อมหัวเผา (burner) 13 kg
น้ำหนักอุปกรณ์ควบคุม 3 kg
ปริมาตร 11 ลิตร
ปริมาตรรวม 20 ลิตร
ความสามารถในการผลิตไฮโดรเจน 1.95 $m^3_{H_2}$/h

ฮีทเตอร์ อัตราใช้เชื้อเพลิง 320 g Propan/h ที่กำลังระบุของฮีตเตอร์
น้ำหนักของ Propan 6.8 kg

สำหรับการสันดาปไฮโดรเจนที่ 2 kW จะต้องใช้หน่วยเก็บพลังงานที่มีน้ำหนักจำเพาะ 26 kg/kg H_2 หรือมี น้ำหนักเป็น 9 เท่าของถังน้ำมันเตาที่ใช้ในฮีตเตอร์

สำหรับรถยนต์กำลัง 50 kW และจุไฮโดรเจน 6 kg เมื่อเป็นการเก็บไฮโดรเจนในรูปแอมโมเนียเนื่องจากต้องการกำลังของอุปกรณ์แยกแก๊สที่สูงทำให้หน่วยเก็บพลังงานมีน้ำหนักจำเพาะสูงขึ้นเป็น 60 kg/kg H_2 ซึ่งหนักเป็น 20 เท่าของถังเก็บเชื้อเพลิงเบนซิน

2.2.2 การเก็บในรูปน้ำ

พบว่า น้ำจำนวน 18 g จะมีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ 2 g คิดเป็น 11% โดยน้ำหนัก และน้ำจำนวน 160 ลิตร จะมีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบ ซึ่งนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เทียบเท่าเบนซิน 65 ลิตร (50 kg) แต่ทั้งนี้ การแยกน้ำออกเป็นไฮโดรเจนกับออกซิเจน จะต้องอาศัยกระบวนการแตกตัวที่อุณหภูมิ 2,000°C ซึ่งถ้าต้องการให้ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องก็จะต้องใช้กระบวนการอื่น กล่าวคือ อาศัยกระบวนการทางเคมี แยกไฮโดรเจนออกมาจากน้ำโดยใช้โลหะแอลคาไล เช่น ลิเทียม (Li) , โซเดียม (Na) , โพแทสเซียม (K) หรือโลหะ แอลคาไลน์เอิร์ท เช่น แบเรียม (Ba) , แคลเซียม (Ca) ทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรง[1]มากน้อยตามปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction)
ดังต่อไปนี้

โลหะแอลคาไล : $2H_2O + 2Me \longrightarrow 2MeOH + H_2 + \Delta H_0^r$ ————(2.5)

โลหะแอลคาไลน์เอิร์ท : $2H_2O + 2Me \longrightarrow Me(OH)_2 + H_2 + \Delta H_0^r$ ————(2.6)

วิธีหนึ่งที่น่าสนใจและมีความเป็นไปได้ทางเทคนิคก็คือ การใช้ แคลเซียมไฮโดรด์ (CaH_2) เพื่อผลิตไฮโดรเจน $Ca H_2$ จะมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้แก๊ซไฮโดรเจนและ $Ca(OH)_2$ ดังสมการ

$$CaH_2 + 2H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 + 2H_2 + \Delta H_0^r \qquad (\Delta H_0^r = -113\ kJ/mol_{H_2}) \quad —— (2.7)$$

จะเห็นว่า กระบวนการนี้ จะมีการคายพลังงานออกมาประมาณ 50% ของค่าความร้อนต่ำสุดของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น (242 kJ/mol H_2) ดังนั้น ถ้าใช้ในรถยนต์จะต้องมีอุปกรณ์สำหรับระบายความร้อนเพิ่มเติม ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ

---

[1] โลหะแอลคาไล (Alkali Metal) เช่น Na , K จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรุนแรงมาก และเกิดสารผลิตผลที่มีคุณสมบัติเป็นกรด จึงไม่เหมาะสมกับการใช้ในรถยนต์ เพราะจะกัดกร่อนถังเชื้อเพลิง

2.2.3 การเก็บในรูปเมทัลไฮไดรด์ (ปฏิกิริยาย้อนกลับได้)

ปัญหาเกี่ยวกับการจัดเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน ได้แก่ น้ำหนัก , ปริมาตร , พลังงานที่ใช้ในการเตรียม นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงสภาวะที่ใช้ในการจัดเก็บ เช่น การเก็บที่ความดันสูง จะต้องพิจารณาเรื่องความปลอดภัยเป็นหลัก แต่ปัญหาที่สำคัญที่สุดคือ เชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีพลังงานต่อหน่วยมวลน้อยเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงเบนซินหรือน้ำมันเตาที่ใช้ในฮีทเตอร์ ดังนั้น เชื้อเพลิงไฮโดรเจนยังไม่สามารถใช้ทดแทนน้ำมันได้ในปัจจุบัน เพราะปัญหาเรื่องน้ำหนักของหน่วยเก็บพลังงานนั่นเอง เว้นแต่ปัญหาด้านมลพิษจะรุนแรงขึ้น เชื่อเพลิงไฮโดรเจนก็สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้

การเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการจัดเก็บนั้น นอกจากจะต้องพิจารณาพลังงานต่อน้ำหนักของหน่วยเก็บแล้ว ยังต้องพิจารณาเงื่อนไขอื่นอีก สำหรับการจัดเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแล้ว การบรรจุและการจ่ายออกจากถังเพื่อใช้งานจะต้องไม่มีปัญหายุ่งยากในแง่พลังงานที่ใช้[1]

หน่วยเก็บพลังงานที่ใช้ควรมีพลังงานต่อหน่วยปริมาตรได้สูงจะไม่เปลืองเนื้อที่ ในด้านความปลอดภัย รูปแบบการจัดเก็บที่เหมาะสม จะต้องไม่มีปัญหาในแง่ของความปลอดภัย เช่นเดียวกับการเก็บในถังความดันสูงและเก็บในรูปไฮโดรเจนเหลว[2] ในด้านราคา ถังเก็บควรจะสามารถใช้กับไฮโดรเจนที่มีแก๊สอื่นเจือปนได้บ้าง (ไฮโดรเจนไม่ต้องบริสุทธิ์มาก) และผู้ใช้สามารถบรรจุไฮโดรเจนใหม่ได้ด้วยตนเอง

สำหรับการเติมและจ่ายไฮโดรเจนเพื่อใช้งานนั้น ความดันและอุณหภูมิขณะเติมและจ่ายไม่ควรสูง ถังบรรจุควรจะทนทาน ไม่ต้องการการดูแลรักษามากนัก สามารถเติมหรือจ่ายไฮโดรเจนได้บ่อยครั้งเท่าที่ต้องการ ด้วยระยะเวลาที่เหมาะสมทางด้านเทคนิค (15-30 นาทีต่อครั้ง) ไม่รั่ว วัตถุดิบหาง่าย ไม่มีปัญหาในการผลิต

เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ที่กล่าวมา การจัดเก็บที่ตรงกับเงื่อนไขที่ต้องการมากที่สุด คือ ถังเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบเมทัลไฮไดรด์ กล่าวคือ

1. ผู้ใช้สามารถเติมไฮโดรเจนเองได้
2. ไฮโดรเจนไม่จำเป็นต้องบริสุทธิ์มาก
3. โลหะหาง่าย และผลิตง่าย
4. ความดันและอุณหภูมิขณะเติมและจ่ายไม่สูงมาก
5. ไม่รั่ว (ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิทำงาน โลหะจะไม่คายไฮโดรเจนออกมา)
6. ระยะเวลาในการเติมหรือจ่ายไฮโดรเจนมีความเหมาะสม

---

[1] การเก็บแบบไฮโดรเจนเหลว จะต้องใช้พลังงานปฐมภูมิสูง ส่วนการเก็บในถังความดันสูง จะใช้พลังงานปฐมภูมิ ต่ำกว่า

[2] การเก็บแบบไฮโดรเจนเหลวจะมีข้อเสีย คือ ไฮโดรเจนสามารถรั่วได้ และไฮโดรเจนที่นำมาเก็บจะต้องบริสุทธิ์ มาก หากมีสารอื่นเจือปน เช่น มีอากาศเจือปนอยู่ อากาศจะกลายเป็นผลึกและผ่านเข้าไปในปั๊ม ทำให้ปั๊มเสียหาย ได้

แต่อย่างไรก็ตาม การจัดเก็บแบบนี้ยังมีข้อด้อยในเรื่องน้ำหนัก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถังเชื้อเพลิงเบนซินที่ให้พลังงานเท่ากัน ถังเมทัลไฮไดรด์จะหนักกว่า 10 – 20 เท่า

เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นขณะจ่ายไฮโดรเจนเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งอาจจะนำไปดัดแปลงเพื่อใช้ปรับอากาศในห้องคนขับได้ (ปกติ กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพเพียง 30 – 35% แต่ถ้าทำได้ถึง 60% จะสามารถใช้ความร้อนจากห้องคนขับไล่ไฮโดรเจนออกจากเมทัลไฮไดรด์ได้ด้วย)

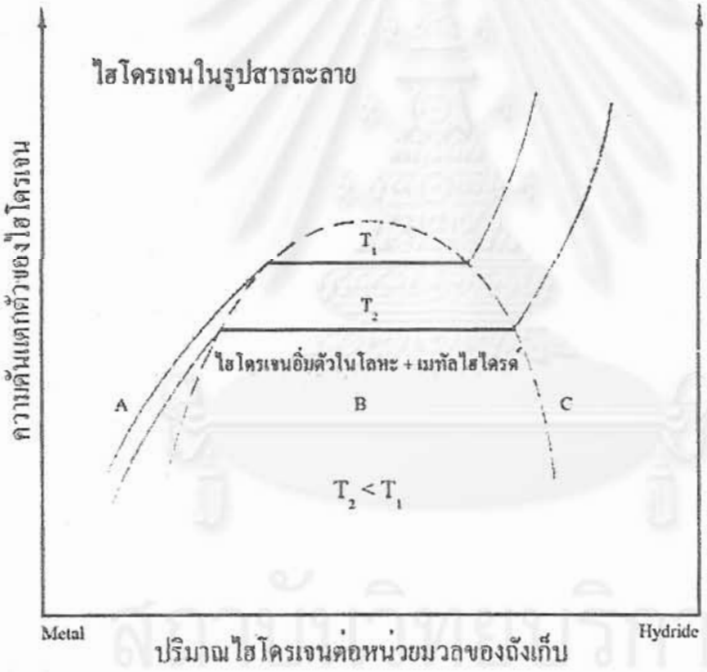
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเมทัลไฮไดรด์

พิจารณาสมการต่อไปนี้[1]

$$H_2 + \text{Metal} \underset{\text{จ่าย}}{\overset{\text{บรรจุ}}{\rightleftharpoons}} \text{Metal Hydride} + \text{Heat} \qquad (3.1)$$

การเกิดเมทัลไฮไดรด์ตามสมการ(2.1) ในความสัมพันธ์กับความดัน อุณหภูมิ และปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometry) สามารถทราบได้โดยการพิจารณาแผนภาพ PCI (Pressure-Composition-Isotherm diagram) และจากแผนภาพเราสามารถทราบถึงข้อมูลทางเทคนิคในการนำเมทัลไฮไดรด์ไปใช้งานดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนภาพ PCI

1. ปริมาณของไฮโดรเจนและพลังงานต่อหน่วยมวลของถังเก็บ [kJ/kg] สามารถอ่านค่าปริมาณของไฮโดรเจนต่อหน่วยมวลของถังเก็บจากแผนภาพ PCI ได้โดยตรง และสามารถคำนวณหาค่าพลังงานต่อหน่วยมวลของถังเก็บได้ โดยค่าความร้อนต่ำสุดของไฮโดรเจนคือ 120 MJ/kg ตัวอย่างเช่น ถ้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์บรรจุไฮโดรเจน 1 โมล (คิดเป็นไฮโดรเจน 2 กรัม ต่อโลหะผสม 100 กรัม) หรือมีค่าความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก จะมีพลังงานต่อหน่วยมวลของถังเก็บเป็น $0.02 \times 120 = 2.4$ MJ/kg

[1]การบรรจุไฮโดรเจนเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ส่วนการจ่ายไฮโดรเจนเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

2. ระดับของอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการใช้งาน เนื่องจากความดันในการใช้งานจริงจะต้องมีค่ามากกว่า 1 bar เพื่อให้สามารถจ่ายไฮโดรเจนได้โดยไม่ต้องใช้ปั๊ม ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทราบระดับของอุณหภูมิที่เมทัลไฮไดรด์แตกตัวโดยให้ความดันสูงกว่า 1 bar และ เพื่อเป็นข้อพิจารณาในเรื่องความปลอดภัย โดยระดับอุณหภูมิที่ให้ความดันแตกตัวที่สูงมากก็มีความจำเป็นต้องทราบ
3. พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาเคมี (Reaction enthalpy , kJ/mol_{H_2}) คือค่าปริมาณความร้อนหรือเอนทาลปีของการเกิด (Enthalpy of formation)(ΔH_f^0 , kJ/mol_{H_2}) เมทัลไฮไดรด์ สามารถคำนวณได้จากสมการ(2.2) ซึ่งมีชื่อเรียกว่าสมการของ van't Hoff ทำให้ทราบปริมาณความร้อนที่ต้องใช้เพื่อจ่ายไฮโดรเจนออกมาได้อย่างต่อเนื่องที่สภาวะใช้งาน (อุณหภูมิและความดันใช้งาน)

$$\ln p_{H_2} = -\frac{\Delta S}{R} + \frac{\Delta H}{RT} \qquad (3.2)$$

โดยที่ p_{H_2} = ความดันแตกตัวของไฮโดรเจน

ΔS = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีขณะที่เกิดเมทัลไฮไดรด์

ΔH = เอนทาลปีของการเกิด

R = ค่าคงที่ของแก๊ส

T = อุณหภูมิ

นอกจากนี้แผนภาพ PCI ยังสามารถใช้ระบุความบริสุทธิ์ของโลหะผสมที่ใช้ได้ (ถ้ามีโลหะชนิดอื่นเจือปนอยู่ เส้นกราฟของแผนภาพ PCI จะเปลี่ยนแปลงไป) นั่นคือ สามารถบอกถึงความถูกต้องแม่นยำของกระบวนการผลิตได้

3.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับแผนภาพ PCI

ในการทำปฏิกิริยากันระหว่างโมเลกุลของไฮโดรเจนกับโลหะผสมนั้น โมเลกุลของไฮโดรเจนจะแตกตัวเป็นอะตอมและเข้าแทรกตัวในเนื้อโลหะ ซึ่งสภาวะทั้งทางฟิสิกส์และเคมีของพื้นผิวของโลหะจะเป็นเงื่อนไขสำคัญต่อการแตกตัวและแทรกตัวของอะตอมไฮโดรเจนและจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาและคิเนติกของปฏิกิริยา จากนั้น เมื่ออะตอมเข้าแทรกตัวในเนื้อโลหะแล้ว ก็จะเกิดเป็นสารละลายไฮโดรเจนในโลหะ จากสมการของ Sieverts พบว่า ความสามารถในการแทรกตัวของไฮโดรเจนในเนื้อโลหะ (L_{H_2}) จะขึ้นอยู่กับความดันของไฮโดรเจน กล่าวคือ

$$L_{H_2} \propto \sqrt{p_{H_2}} \qquad (3.3)$$

นั่นคือ ถ้าไฮโดรเจนมีความดันสูงขึ้น ก็จะสามารถแทรกตัวเข้าในเนื้อโลหะได้มากขึ้น (แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ) ซึ่งในขณะที่ไฮโดรเจนละลายเข้าไปในเนื้อของโลหะนั้น จะมีองค์ประกอบของสาร 2

ชนิดในระบบ คือ โลหะและไฮโดรเจน และจะอยู่ใน 2 เฟส คือ แก๊สและของแข็ง ดังนั้น ระดับขั้นความเสรี (degree of freedom) ของระบบ จะเป็นไปตามกฎเฟสของกิบส์ (Gibbs phase rule) กล่าวคือ

$$P + F = C + 2 \qquad (3.4)$$

โดยที่ P = จำนวนเฟสที่อยู่ด้วยกันได้ในระบบปิด

C = จำนวนองค์ประกอบ (component) ในระบบ

F = ระดับขั้นความเสรี (degree of freedom)

ซึ่งจะได้ว่า ในขณะที่ไฮโดรเจนละลายเข้าไปในเนื้อของโลหะ จะมีจำนวนตัวแปรซึ่งเปลี่ยนแปลงอิสระโดยไม่เปลี่ยนจำนวนเฟสในสภาวะสมดุลในระบบปิดจำนวน 2 ตัวแปร ได้แก่ ความดันและอุณหภูมิ ถ้าหากกระบวนการนี้เป็นกระบวนการอุณหภูมิคงที่ จะได้ว่า ปริมาณไฮโดรเจนที่แทรกตัวเข้าไปในโลหะได้จะขึ้นอยู่กับความดัน ดังแสดงในกราฟช่วง A ของรูปที่ 3.1

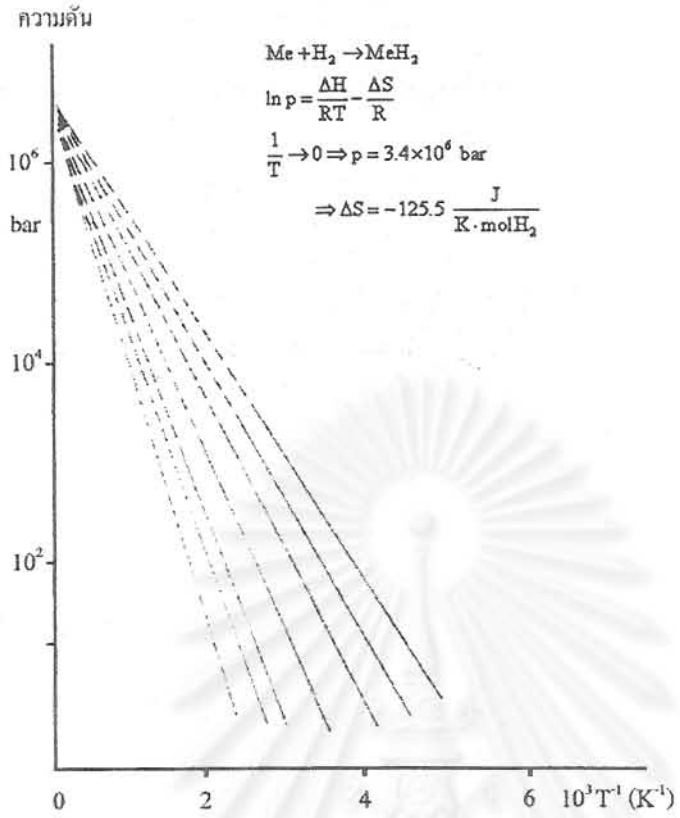
ต่อจากนั้น หลังจากไฮโดรเจนละลายในโลหะจนอิ่มตัวแล้ว ไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับโลหะเกิดเป็นเมทัลไฮไดรด์ดังสมการ(3.1) ในช่วงนี้จะมี 3 เฟสอยู่ด้วยกันในสภาวะสมดุล จากสมการ(3.4)จะได้ว่าระดับขั้นความเสรีเป็น 1 ซึ่งในกรณีนี้กำหนดให้เป็นกระบวนการอุณหภูมิคงที่ ดังนั้น ระดับขั้นความเสรีจะเป็น 0 นั่นคือ ความดันจะต้องคงที่ด้วย ในขณะที่ปริมาณไฮโดรเจนในโลหะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในกราฟช่วง B ของรูปที่ 3.1

เมื่อไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับโลหะจนเกิดเป็นเมทัลไฮไดรด์อย่างสมบูรณ์แล้ว ก็จะเหลือเฟสของแข็งเพียงเฟสเดียว คือ เมทัลไฮไดรด์ เมื่อเติมไฮโดรเจนเข้าไป ไฮโดรเจนก็จะแทรกตัวอยู่ในเมทัลไฮไดรด์ ซึ่งจะทำให้ความดันของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นตามสมการ(3.3) ดังแสดงในกราฟช่วง C ของรูปที่ 3.1

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความดันแตกตัว[1]ของไฮโดรเจนจะสูงขึ้น เส้นกราฟบริเวณที่ความดันคงที่ (ช่วง B ของรูปที่ 3.1) จะสั้นลง นั่นคือ จะมีอุณหภูมิวิกฤตค่าหนึ่งที่เมทัลไฮไดรด์จะไม่เสถียร และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตนี้ เมทัลไฮไดรด์จะแยกตัวเป็นไฮโดรเจนกับโลหะผสม ซึ่งสำหรับถังเก็บที่ปิดสนิท ความดันที่เพิ่มขึ้นอาจจะสูงจนทำให้ถังระเบิดได้ ดังนั้น การทราบค่าอุณหภูมิวิกฤตจากแผนภาพ PCI จึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อสามารถกำหนดระดับของอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการใช้งานได้ ข้อมูลที่ได้จากแผนภาพ PCI นำไปสู่สมการ(3.2)

---

[1] ไฮโดรเจนที่เติมเข้าไปอยู่ในรูปโมเลกุล และจะแตกตัวเป็นอะตอมที่ผิวของโลหะผสมที่อุณหภูมิและความดันค่าหนึ่ง เรียกความดันค่านั้นว่า ความดันแตกตัว



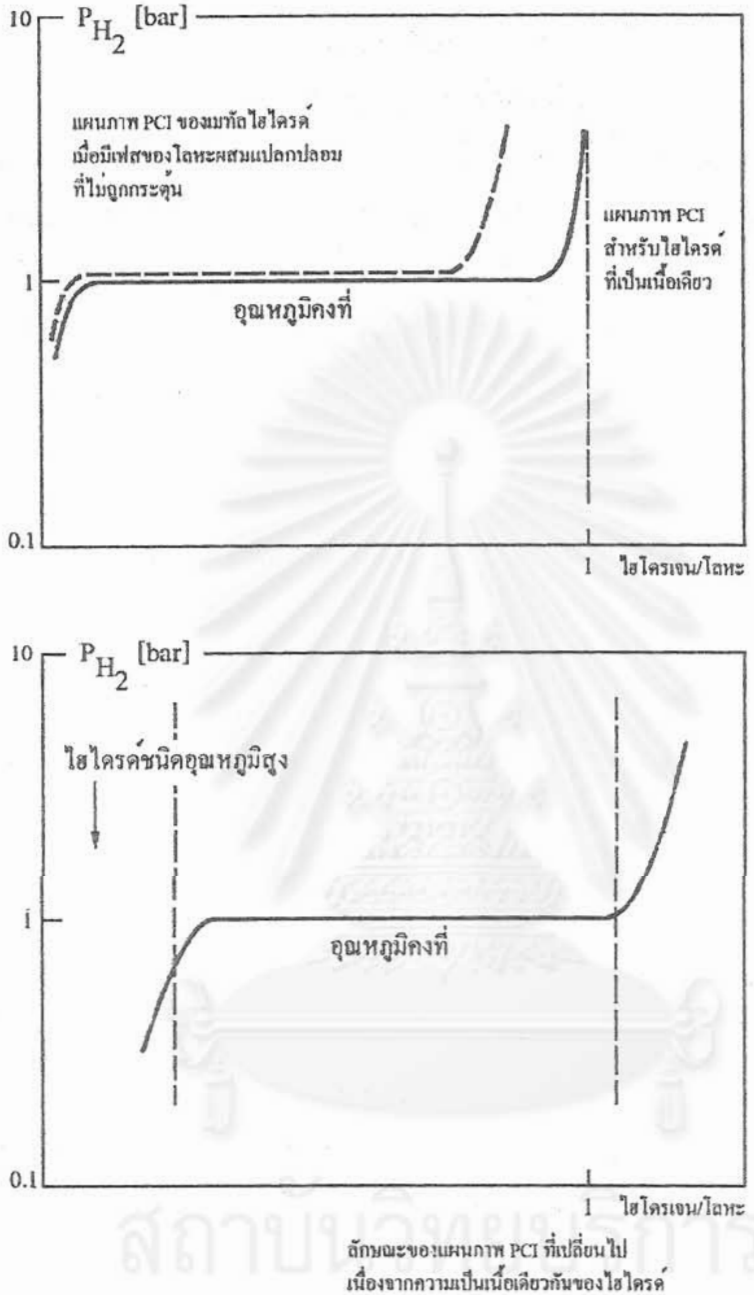
รูปที่ 3.2 van't Hoff-Isochoren diagram

จากสมการของ van't Hoff เมื่อทดลองคำนวณโดยกำหนดให้อุณหภูมิ , ความดัน , และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีอยู่ในช่วงที่เราสนใจเชิงเทคนิคมีค่าคงที่ คือ 300 K, 1 bar, -125.5 J/mol_{H_2} ตามลำดับแล้ว จะได้ค่า ΔH_f^0 ที่เปลี่ยนแปลงจากสมการ(3.5)

$$\Delta H_f^0 = \frac{R\ln(\frac{P_2}{P_1})}{(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1})} \qquad (3.5)$$

ซึ่งค่าที่ได้ค่อนข้างแม่นยำ และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ได้จากค่าความร้อนถ่ายเทที่ต้องการใช้ในการกระบวนการเติมหรือจ่ายไฮโดรเจน โดยที่ไม่ต้องทำการทดลอง

ในการทดลองเพื่อสร้างแผนภาพ PCI ของถังเก็บแบบเมทัลไฮไดรด์ ปริมาณความจุของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน จะบอกเป็นความเข้มข้นของมวลไฮโดรเจนต่อมวลของโลหะผสมที่ใช้เก็บไฮโดรเจน ดังนั้น แผนภาพ PCI จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณสารเจือปนและความเป็นเนื้อเดียวกันของโลหะผสมที่ใช้ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3.3 แผนภาพ PCI แสดงความเป็นเนื้อเดียวกัน (ความบริสุทธิ์) ของโลหะผสม

หากโลหะที่เจือปนในโลหะผสมไม่มีความสามารถที่จะจับตัวกับไฮโดรเจนได้ ช่วงความดันคงที่ในแผนภาพ PCI จะสั้นลง และหากเปรียบเทียบกับแผนภาพ PCI ที่ได้จากโลหะผสมบริสุทธิ์ จะทำให้ทราบปริมาณสารเจือปนได้ แต่ถ้าโลหะที่เจือปนมีความสามารถที่จะจับไฮโดรเจน และแปรสภาพไปเป็นเมทัลไฮไดรด์ได้ ช่วงความดันคงที่ของเมทัลไฮไดรด์เดิมจะสั้นลง และจะมีเส้นความดันคงที่ของการเกิดเมทัลไฮไดรด์ของโลหะเจือปนในช่วงอื่นเพิ่มขึ้นมาแทน

3.2 มุมมองทางเทคนิคเกี่ยวกับเมทัลไฮไดรด์

การที่ไฮโดรเจนแตกตัวเป็นอะตอมและเข้าไปจับเป็นพันธะเคมีในเฟสของโลหะ ทำให้ความดันสมดุลของถังแบบเมทัลไฮไดรด์ต่ำกว่าความดันสมดุลของถังเก็บแบบความดันสูงถึง 3 เท่า ที่ปริมาณไฮโดรเจนเดียวกัน ทำให้มีความปลอดภัยสูงกว่า นอกจากนี้ความหนาแน่นของไฮโดรเจนที่เก็บต่อปริมาตรถังเมทัลไฮไดรด์ยังสูงกว่าการเก็บในรูปไฮโดรเจนเหลวอีกด้วย แต่เนื่องจากมวลของโลหะผสมในถังมีค่าสูง ทำให้ความหนาแน่นพลังงานโดยน้ำหนักของการเก็บในรูปเมทัลไฮไดรด์ค่อนข้างต่ำ คือประมาณ 2 - 8 MJ/kg เมทัล เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงเบนซินที่มีค่าประมาณ 40 MJ/kg ดังนั้นการเก็บในรูปเมทัลไฮไดรด์จะทำให้หน่วยพลังงานที่ได้มีน้ำหนักสูงกว่าเบนซินประมาณ 5 - 20 เท่า สำหรับการใช้งานแบบเคลื่อนที่ได้ (ใช้ในรถยนต์) เนื่องจากต้องมีอุปกรณ์เสริมช่วยในการจ่ายและเติมไฮโดรเจนขณะใช้งาน หน่วยเก็บพลังงานในรูปเมทัลไฮโดรด์จะมีน้ำหนักสูงกว่าเบนซิน 10-20 เท่า แต่หากเป็นการใช้งานแบบอยู่กับที่ ก็จะมีน้ำหนักสูงกว่าเบนซินประมาณ 5 เท่า เพราะคิดเฉพาะน้ำหนักของตัวเมทัลไฮไดรด์ได้ สำหรับการเก็บในรูปพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ เมื่อเทียบกับเมทัลไฮไดรด์ ความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่จำพวก Fe-Ni , Cd-Ni และ Zn-Ni จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 75 - 200 kJ/kg ซึ่งน้อยกว่าเบนซิน 200 - 500 เท่า และยังเก็บพลังงานได้น้อยกว่าการเก็บในรูปเมทัลไฮไดรด์ถึง 10-25 เท่า

3.3 การแบ่งชนิดของเมทัลไฮไดรด์

ตัวแปรที่สำคัญที่สุดคือ อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรเจน ที่ความดันสูงกว่า 1 bar เนื่องจากถ้าความดันสูงกว่า 1 bar การนำไฮโดรเจนออกมาใช้งานจะไม่ต้องอาศัยปั๊มช่วย การแบ่งเมทัลไฮไดรด์ตามอุณหภูมิใช้งานที่ความดันสูงกว่า 1 bar จะแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. เมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำ (เริ่มต้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C)
2. เมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานปานกลาง (100 - 200°C)
3. เมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูง (อุณหภูมิสูงกว่า 200°C)

เวลาที่ใช้ในการบรรจุไฮโดรเจนจะขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิ และชนิดของเมทัลไฮไดรด์ที่ใช้ นอกจากนี้ เมทัลไฮไดรด์ทุกชนิดจะมีคุณสมบัติที่สำคัญร่วมกันคือมีการขยายตัวของปริมาตรเซลล์ทุกครั้งที่มีการเติมไฮโดรเจน ดังนั้นในการออกแบบถังเก็บจะต้องคำนึงถึงจุดนี้ด้วย เพื่อไม่ให้ถังเก็บเกิดการเสียรูปอย่างถาวรเมื่อโลหะผสมเปลี่ยนสภาพไปเป็นเมทัลไฮไดรด์หลังเติมไฮโดรเจน

3.3.1 เมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำ

สำหรับเมทัลไฮไดรด์ชนิดนี้ส่วนมากอุณหภูมิแตกตัวจะมีค่าอยู่ระหว่าง -30 ถึง +50°C ที่ความดันเท่ากับหรือมากกว่า 1 bar ดังนั้น เมทัลไฮไดรด์ชนิดนี้จะไม่เสถียร คือสามารถแตกตัวเป็นไฮโดรเจนได้เองที่อุณหภูมิห้อง

การใช้งานทางเทคนิคมีคุณสมบัติที่ต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

- เนื่องจากความไม่เสถียร เอนทาลปีของปฏิกิริยา (ΔH) จะมีค่าต่ำ โดยทั่วไปจะมีค่าน้อยกว่า 30 kJ/mol_{H_2} ซึ่งน้อยกว่า 15% ของค่าความร้อนต่ำสุดของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน ดังนั้น การดึงไฮโดรเจนออกมาใช้งานจะอาศัยปริมาณความร้อนค่อนข้างน้อย ที่อุณหภูมิต่ำ
- เนื่องจากเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำจะให้ความดันแตกตัวไฮโดรเจนค่อนข้างสูง ดังนั้นจะมีข้อดีในทางเทคนิค คือ สามารถจ่ายไฮโดรเจนออกจากถังเก็บได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้ปั๊ม
- ในการบรรจุไฮโดรเจนเข้าสู่ถังต้องใช้ความดันสูง (10 - 50 bar)
- ความร้อนที่ได้จากการบรรจุไฮโดรเจน ซึ่งมีค่าประมาณ 15% ของค่าความร้อนต่ำสุดของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ คือประมาณ 40 - 80°C ซึ่งจัดเป็นความร้อนคุณภาพต่ำซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ไม่ค่อยได้

สำหรับเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำ จะใช้โลหะผสมที่มีน้ำหนักอะตอมอย่างน้อย 48 และจะได้ความจุไม่เกิน 2.2% โดยน้ำหนัก ถังชนิดนี้จึงมีน้ำหนักมากกว่าถังน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซินถึง 20 เท่า แต่ข้อดีก็คือสามารถใช้งานได้ทั้งกับแบบเคลื่อนที่ได้และแบบอยู่กับที่ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -30°C ขึ้นไป แม้ว่าจะมีความจุค่อนข้างต่ำ แต่ก็สามารถจ่ายไฮโดรเจนได้อย่างต่อเนื่อง

3.3.2 เมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานปานกลาง

เมทัลไฮไดรด์ชนิดนี้จะมีความเสถียรมากขึ้น และมีอุณหภูมิแตกตัวของไฮโดรเจนอยู่ระหว่าง 100 - 200°C ที่ความดัน 1 bar

การใช้งานทางเทคนิคมีคุณสมบัติที่ต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

- เอนทาลปีจากปฏิกิริยา (ΔH) มีค่าอยู่ระหว่าง 15 - 25% ของค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำสุดของไฮโดรเจน ซึ่งความร้อนปริมาณนี้จะคายออกในขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าสู่ถัง โดยมีอุณหภูมิสูงกว่า 100°C จึงสามารถนำความร้อนนี้ไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นได้สะดวก
- เนื่องจากมีอุณหภูมิแตกตัวของไฮโดรเจนค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงมีเสถียรภาพค่อนข้างสูง แม้ถังบรรจุเมทัลไฮไดรด์ต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ก็จะไม่ก่อให้เกิดความดันภายในถังสูงมากจนถึงขีดอันตรายได้ จึงมีความปลอดภัยสูง

ในการบรรจุไฮโดรเจนสามารถทำได้ที่ความดันน้อยกว่า 5 bar และถังเชื้อเพลิงชนิดนี้จะมีความจุไม่เกิน 2.5% โดยน้ำหนัก ดังนั้นเมื่อมองในแง่ความปลอดภัย รวมทั้งระดับความดันที่ใช้บรรจุและคุณภาพของพลังงานความร้อนที่คายออกขณะบรรจุไฮโดรเจน เมทัลไฮไดรด์ชนิดนี้ก็จะมีความเหมาะสมอย่างมาก

3.3.3 เมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูง

เนื่องจากอุณหภูมิแตกตัวของไฮโดรเจนที่ความดัน 1 bar มีค่าสูงมากกว่า 200°C (บางกรณีสูงกว่า 700°C) ทำให้เมทัลไฮไดรด์ชนิดนี้มีเสถียรภาพสูงมาก

การใช้งานทางเทคนิคมีคุณสมบัติที่ต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

- เอนทาลปีของปฏิกิริยา (ΔH) มีค่าสูงกว่า 80 kJ/mol_{H_2} และมีขนาดมากกว่า 30% ของค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำสุดของไฮโดรเจน และพลังงานความร้อนที่คายขณะบรรจุไฮโดรเจนเป็นพลังงานความร้อนคุณภาพสูง (อุณหภูมิสูงมาก) จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย
- เนื่องจากความมีเสถียรภาพที่สูงมาก ณ อุณหภูมิห้อง ดังนั้นเมทัลไฮไดรด์ชนิดนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีมาตรการความปลอดภัยใด ๆ และสามารถปล่อยทิ้งไว้ในบรรยากาศปกติได้
- โลหะผสมที่ใช้ทำเมทัลไฮไดรด์ชนิดนี้ จะเป็นโลหะเบาจำพวก แมกนีเซียม อะลูมิเนียม และส่วนผสมของโลหะอื่น ๆ ที่มีน้ำหนักเบา ทำให้มีความจุโดยน้ำหนักสูงมาก เช่น MgH_2 มีความจุสูงถึง 8% โดยน้ำหนัก และได้ความหนาแน่นพลังงานเป็น 10 $MJ/kg_{เมทัลไฮไดรด์}$ และมีน้ำหนักสูงกว่าถังเชื้อเพลิงเบนซินเพียง 4 เท่า

ในการบรรจุไฮโดรเจนสำหรับโลหะผสมชนิดนี้ สามารถทำได้ที่ความดันน้อยกว่า 1 bar แต่เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดในขณะทำการบรรจุไฮโดรเจนลงในโลหะผสมชนิดนี้ มีอุณหภูมิสูงมาก ดังนั้นเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ใช้จะต้องมีความบริสุทธิ์สูงมาก (99.99%) เพราะหากมีแก๊สเจือปนอื่น แก๊สเหล่านี้จะมีผลทำให้ผิวของโลหะผสมเสื่อมสภาพไป (เฉื่อยต่อปฏิกิริยา) ทำให้ไฮโดรเจนไม่สามารถแพร่เข้าสู่โลหะผสมได้ดีดังเดิม

3.4 ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของเมทัลไฮไดรด์

ข้อจำกัดที่สำคัญของการใช้งานถังเก็บเชื้อเพลิงแบบเมทัลไฮไดรด์ คือ ระยะเวลาทางเทคนิคของการบรรจุไฮโดรเจนใหม่อีกครั้ง เนื่องจากปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยาการจ่ายไฮโดรเจนออกจากถังมาก พารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อความเร็วปฏิกิริยา ประกอบด้วย

1. อุณหภูมิ
2. ความดันของไฮโดรเจนที่ใช้ในการบรรจุ
3. ค่าคงที่ของการแพร่กระจาย (Diffusion Constant) ของไฮโดรเจนในโครงสร้างผลึกโลหะ

เนื่องจากเป็นการพิจารณาความเร็วของปฏิกิริยา จึงสมมุติให้ผิวของเม็ดโลหะผสมอยู่ในสภาพที่พร้อมเกิดปฏิกิริยาคือเป็นผิวที่สะอาดและปราศจากสารเคลือบผิวที่เป็นตัวปิดกั้นไฮโดรเจน และทำการพิจารณาการเกิดปฏิกิริยากับเม็ดโลหะผสมโดยตรง โดยให้เม็ดโลหะผสมมีขนาดอยู่ระหว่าง 10-1000 ไมครอน ส่วนการพิจารณาคิเนติกของถังเก็บซึ่งขึ้นกับความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของถังจะพิจารณาในหัวข้อ 3.8 การนำความร้อนของถังเมทัลไฮโดรด์

สำหรับเมทัลไฮโดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำ จะพบว่าความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาจะสูงถึงแม้ที่อุณหภูมิต่ำถึง -50°C ความเร็วของปฏิกิริยาก็ยังคงสูงพอเพื่อที่จะทำให้เกิดเป็นเมทัลไฮโดรด์โดยสมบูรณ์ ความดันที่ใช้จะอยู่ที่ 5-50 bar โดยความดันที่สูงจะใช้เมื่อต้องการให้เวลาในการชาทร์ไฮโดรเจนสั้นลงคือประมาณ 5-10 นาที ขนาดของเม็ดโลหะผสมที่ใช้จะมีขนาดเท่ากับหรือเล็กกว่า 100 ไมครอนเนื่องจากความเร็วในการแพร่ของไฮโดรเจนในโลหะผสมค่อนข้างสูงและการเกิดเป็นเมทัลไฮโดรด์จะเกิดอย่างฉับพลัน ดังนั้นเวลาที่ใช้เติมไฮโดรเจนของถังเมทัลไฮโดรด์ชนิดอุณหภูมิต่ำจะขึ้นกับการออกแบบถังเก็บเพียงอย่างเดียว (หัวข้อ 3.8)

สำหรับเมทัลไฮโดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูง จะพบว่าความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาจะเริ่มสังเกตุได้เมื่ออุณหภูมิ $T \geq 150^{\circ}C$ ภายใต้ความดัน 1 ถึง 10 bar เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวความเร็วของการแพร่ของไฮโดรเจนในโลหะผสมสูงพอส่วนปฏิกิริยาการเกิดเมทัสไฮโดรด์ก็จะเกิดอย่างฉับพลันเช่นเดียวกับปฏิกิริยาเคมีทั่วๆไป ปฏิกิริยาการเกิดเมทัลไฮไดรด์จะมีระดับอุณหภูมิที่เป็นขีดจำกัด ตั้งแต่ระดับอุณหภูมินี้ขึ้นไปความเร็วของปฏิกิริยาจะมีค่าสูงเพียงพอสำหรับการใช้งานทางเทคนิค สำหรับเมทัลไฮโดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำจะอยู่ที่ $T<-100^{\circ}C$ ดังนั้นในทางปฏิบัติจะพบว่าเมทัลไฮโดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำจะมีความเร็วของปฏิกิริยาพอเสมอส่วนเมทัลไฮโดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูง ระดับอุณหภูมิขีดจำกัดจะอยู่ที่ $+150^{\circ}C$ สำหรับเมทัสไฮโดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานปานกลางและสูง อัตราการจ่ายไฮโดรเจน (g H_2/min) จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิใช้งานที่สูงขึ้น

สำหรับการใช้งานทางเทคนิคที่น่าสนใจจะมีเมทัลไฮไดรด์ 2 ชนิด คือ MgH_2 และ Ti_2Ni-hydride ซึ่งมีความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาที่ดี แต่จากการทดลองวัดของ Töpler พบว่า สำหรับ MgH_2 จะมีความเร็วของการแพร่กระจายโมเลกุลไฮโดรเจนค่อนข้างต่ำเมื่อขนาดของเม็ดโลหะผสมใหญ่กว่า 30 ไมครอน และ Bogdanovic ได้คิดค้นวิธีที่จะทำให้ได้ผงแมกนีเซียมที่มีขนาดเล็กลง (ประมาณ 5 ไมครอน) ซึ่งเรียกว่า High Active Magnesium ซึ่งภายใต้เงื่อนไขนี้ ระยะทางในการแพร่ของอะตอมไฮโดรเจนจะสั้นลง ถึงแม้ความเร็วในการแพร่จะต่ำ ปฏิกิริยาขณะบรรจุและจ่ายไฮโดรเจนจะเร็วขึ้น ข้อเสียของวิธี High Active Magnesium คือ ผงโลหะนี้จะทำปฏิกิริยาสันดาปกับอากาศอย่างฉับพลันและรุนแรง

3.5 ผลของแก๊สเจือปนในไฮโดรเจนต่อเมทัลไฮไดรด์

3.5.1 การกระตุ้นโลหะผสมให้กลับมา Active

การทดลองและการพัฒนาที่เกี่ยวกับเมทัลไฮไดรด์ทั้งหมดได้มาจากการทดลองโดยใช้แก๊สไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.995%) ซึ่งมีแก๊สหรือสิ่งเจือปนอื่น ๆ อยู่เพียง 50 ppm ซึ่งน้อยมากและจะไม่มีผลกระทบต่อการเกิดเมทัลไฮไดรด์ นอกจากนี้ การทดลองและสรุปผลทั้งหมดมาจากข้อสมมติว่าผิวโลหะผสมทุกส่วนอยู่ในสภาพที่พร้อมจะเกิดปฏิกิริยาเป็นเมทัลไฮไดรด์ได้ทันที ซึ่งข้อสมมติดังกล่าวข้างต้น อาจไม่สามารถเป็นจริงได้ในทางปฏิบัติ

ในขบวนการผลิตโลหะผสม ซึ่งต้องบดเนื้อโลหะผสมให้เป็นผงละเอียด ซึ่งขั้นตอนการจัดเตรียมวัตถุดิบและการบรรจุลงถังเก็บ จะกระทำในบรรยากาศปกติเพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย ทำให้ผิวของโลหะผสมต้องสัมผัสกับอากาศและความชื้น ทำให้เกิดพื้นผิวที่เฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้ เนื่องจากมีฟิล์มของสารเจือปนจับอยู่ที่ผิว แต่โลหะผสมเหล่านี้เมื่อนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนในสูญญากาศ ก็จะสามารถกลับมาเป็นพื้นผิวที่ไวต่อปฏิกิริยา (Active) ได้ดังเดิม การทำให้โลหะผสมกลับมา Active อาจทำโดยตรงในถังเก็บหรือทำภายนอกก็ได้ เช่น โดยการเผาโลหะผสมให้ร้อนก่อนบรรจุลงถังเก็บ ซึ่งวิธีการและเทคนิคต่าง ๆ เหล่านี้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่ใช้ ตัวอย่างกระบวนการในการทำให้โลหะผสมของ TiFe กลับมา Active อีกครั้ง มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

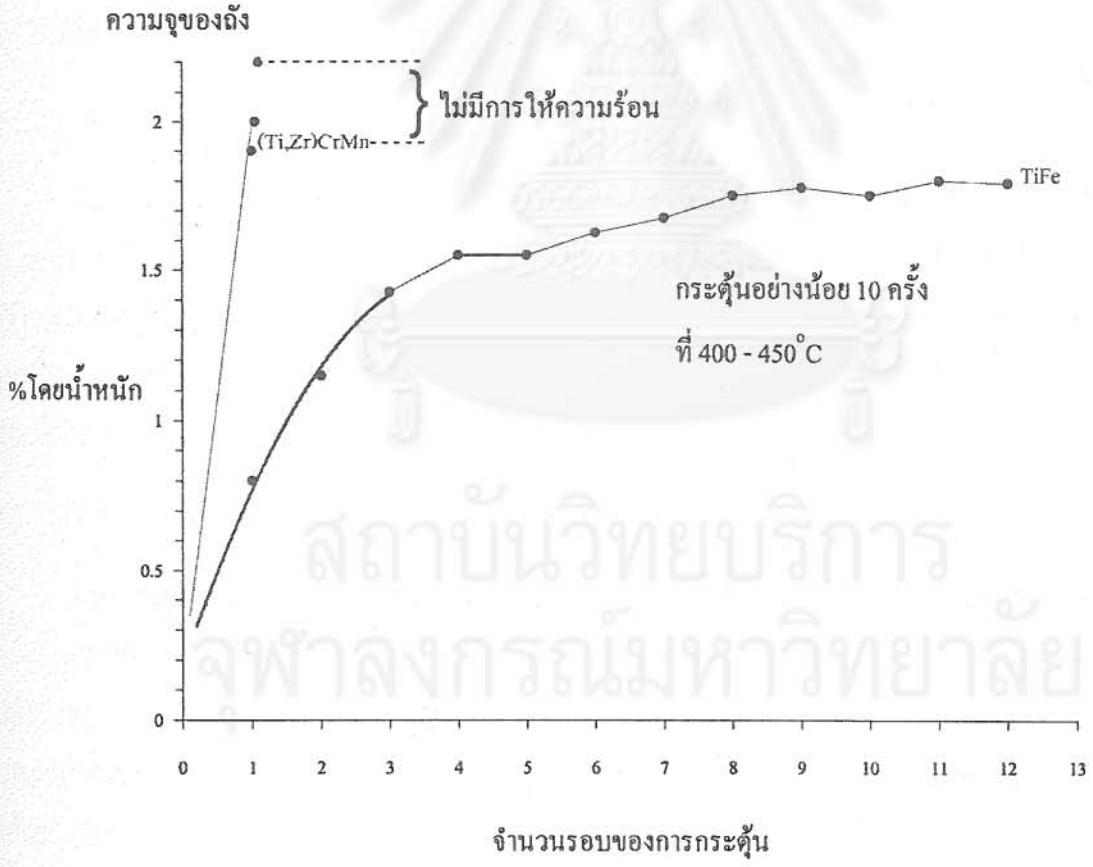
1. ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C ในสูญญากาศ 10^{-2} bar
2. ล้างด้วยไฮโดรเจนบริสุทธิ์ที่ความดันไม่เกิน 5 bar
3. ปล่อยให้เย็นลงภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน

กระบวนการทั้ง 3 ขั้นตอนนี้จะถูกทำซ้ำจนกว่าถังเมทัลไฮไดรด์จะมีความจุถึงค่าสูงสุด ซึ่งโดยทั่วไป จะต้องทำซ้ำ 5 - 10 ครั้ง นอกจากนี้ สภาวะเริ่มต้นของโลหะผสมก็มีความสำคัญต่อการทำให้โลหะผสม Active เช่น ถ้าโลหะผสมของ TiFe มีขนาดเกรนประมาณ 1 mm การจะทำให้โลหะผสมนี้บริสุทธิ์อย่างสมบูรณ์จะทำได้ค่อนข้างยาก หากทิ้งไว้ในบรรยากาศนานเกิน 1 ปี แต่ถ้าเกรนมีขนาดประมาณ 50 ไมครอน ก็จะสามารถทำให้กลับมา Active ได้โดยการผ่านกระบวนการเพียงไม่กี่ครั้ง

จากการทดลองพบว่า หากโลหะผสมของ TiFe สัมผัสกับอากาศประมาณ 10 นาที เช่น ในขณะเติมลงถังเก็บ พบว่า ในกรณีนี้ สามารถทำให้โลหะผสมกลับมา Active ได้โดยการลดความดันในถังให้เป็นสุญญากาศที่10^{-2} bar ประมาณ 10 นาที โดยกันไม่ให้อากาศภายนอกเข้าไปอีก เนื่องจากเวลาที่สัมผัสอากาศเพียงแค่ 10 นาที แก๊สออกซิเจนในบรรยากาศยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโลหะผสม มีเพียงแต่โมเลกุลของอากาศไปยึดเกาะกับผิวของโลหะผสมเท่านั้น (Adsorption)

ออกซิเดชันที่ผิวของโลหะผสมจะเกิดขึ้นได้จำเป็นต้องอาศัยระยะเวลานานพอสมควร การสัมผัสกับอากาศเพียงระยะสั้นจะก่อให้เกิดปฏิกิริยา Adsorption เท่านั้น ผลของโมเลกุลอากาศที่เกาะอยู่ที่ผิวของโลหะผสมจำนวนน้อยที่ยังขจัดออกไม่หมดจะมีผลต่อถังเก็บในเชิง Dynamics ของถังแต่

จะไม่มีผลต่อความจุและลักษณะสมบัติต่างๆ ในแผนภาพ PCI ในทางตรงข้าม โลหะผสมบางชนิด เช่น TiCrMn ที่เรียกกันว่า Lavesphasenhydride สามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้ทันที แม้สัมผัสกับอากาศมาเป็นเวลานาน โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทางความร้อนใด ๆ คุณสมบัติพิเศษของโลหะผสมนี้จะช่วยให้สามารถเลือกวัสดุอื่น ๆ มาทำเป็นถังบรรจุได้ เช่น เหล็ก อะลูมิเนียม และไฟเบอร์กลาส โดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงความสามารถในการทนความร้อนสูงมาก สำหรับโลหะผสมชนิดอุณหภูมิใช้งานสูง เช่น พวก Mg_2Ni การทำให้โลหะผสมชนิดนี้ Active จำเป็นต้องให้ผ่านกระบวนการทางความร้อนคล้ายกับ TiFe และเนื่องจากเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูงจะมีเสถียรภาพสูงมากที่อุณหภูมิห้อง จึงควรบรรจุเมทัลไฮไดรด์สำเร็จรูปลงในถังแทนการบรรจุโลหะผสม และหลังจากบรรจุแล้ว การจ่ายไฮโดรเจนในครั้งแรกจะเป็นการไล่ทำความสะอาดผิวออกไซด์และความชื้นไปในตัว สำหรับข้อพึงระวังในการใช้โลหะผสมชนิดนี้ คือ หากขนาดเกรนของโลหะผสมเล็กมาก มันจะสามารถทำปฏิกิริยากับอากาศและลุกไหม้ได้เอง



รูปที่ 3.4 ผลจากการกระตุ้น Lavesphasenhydride (ตัวอย่างเช่น TiZrCrMn) และ TiFe-Hydride

3.5.2 ผลของการปนเปื้อน

ในขณะที่โลหะผสมอยู่ในสภาพ Active หากแก๊สไฮโดรเจนที่นำมาใช้บรรจุไม่มีความบริสุทธิ์เพียงพอ จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของผิวโลหะผสมได้ (เฉื่อยต่อปฏิกิริยา) ซึ่งปัญหานี้จะถูกจำกัดวงไว้โดย

- ไฮโดรเจนที่ใช้ในการบรรจุจะได้มาจากแก๊สผสมที่มีไฮโดรเจนอยู่ เช่น แก๊สธรรมชาติ หรือไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการแยกน้ำทางไฟฟ้า ซึ่งจะได้ความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปจะมีแก๊สปนเปื้อนอยู่ระหว่าง 50 - 100 ppm
- ในการจ่ายแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80°C จะเป็นการกระตุ้นให้ผิวของโลหะผสม Active ด้วย ซึ่งช่วยให้ผิวของโลหะผสมสะอาดอยู่เสมอ

ดังนั้นกระบวนการขณะบรรจุไฮโดรเจนจะสำคัญมากถ้ามีแก๊สเจือปนอยู่ การสะสมของแก๊สเจือปนในทางปฏิบัติจะเกิดขึ้นกับเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูง เนื่องจากขณะเติมไฮโดรเจนจะทำที่อุณหภูมิสูงกว่า 300°C ซึ่งอุณหภูมิที่สูงมากขนาดนี้ เพียงพอที่จะทำให้เกิดออกไซด์ , ไนไตรด์ หรือคาร์ไบด์ได้

3.5.2.1 ผลของการเกาะตัวทางฟิสิกส์ (Adsorption)

ในกรณีนี้โมเลกุลของแก๊สจะเกาะติดผิวของโลหะผสมอย่างไม่มั่นคง พลังงานที่เกิดก็มีค่าต่ำ และหลังจากที่โมเลกุลแก๊สเกาะกับผิวโลหะผสมจนทั่วแล้ว แก๊สอื่น ๆ ก็จะไม่สามารถเข้าไปยึดเกาะที่ผิวโลหะผสมได้อีก ผลของการเกาะตัวนี้ทำให้ความเร็วของปฏิกิริยาช้าลง (คิเนติกของถังแย่ลง) เนื่องจากพื้นผิวโลหะผสมส่วนที่ไฮโดรเจนผ่านเข้าออกได้ลดลง ส่วนความจุของเมทัลไฮไดรด์ ลักษณะสมบัติบนแผนภาพ PCI และเอนทาลปีของปฏิกิริยายังคงเดิม

3.5.3.2 ผลของการเกาะตัวทางเคมี (Chemisorption)

ในกรณีของการเกาะตัวทางเคมี โมเลกุลของแก๊สปนเปื้อนจะเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมที่ผิวของโลหะผสมเกิดเป็นพันธะยึดเหนี่ยวทางเคมี เช่น ออกไซด์ คาร์ไบด์ และไนไตรด์ ซึ่งมีพลังงานปฏิกิริยาสูงประมาณ 100 kJ/mol ซึ่งสูงกว่าพลังงานของปฏิกิริยาการเกาะตัวทางฟิสิกส์มาก ดังนั้นการกำจัดเคลือบผิวเหล่านี้ออกจากผิวโลหะผสม จึงไม่สามารถทำได้โดยอาศัยการเพิ่มอุณหภูมิและทำให้เป็นสูญญากาศ

หากปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้เติมมีปริมาณสารเจือปนสูงเพียงพอ ผิวของโลหะผสมจะถูกเคลือบด้วยชั้นของออกไซด์อย่างสมบูรณ์ในเวลาอันสั้น และแก๊สไฮโดรเจนจะไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้เลย แต่หากปริมาณแก๊สเจือปนมีไม่สูงมากพอที่จะทำให้เกิดการเกาะตัวทางเคมีบนผิว

โลหะผสมได้ทั้งหมด ไฮโดรเจนก็จะสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อโลหะผสมในบริเวณพื้นผิวที่ไม่ถูกเคลือบได้ แต่ระยะทางในการแพร่ของไฮโดรเจนจะสูงขึ้น ทำให้การบรรจุและจ่ายไฮโดรเจนต้องใช้เวลานานขึ้น แต่การเกิดการเกาะตัวทางเคมีนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะกับโลหะผสมชนิดอุณหภูมิใช้งานสูงและมีพื้นผิวที่ไม่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นในการเติมไฮโดรเจนจะต้องใช้ไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.995%

3.6 การนำความร้อนของเมทัลไฮไดรด์

ความเร็วของปฏิกิริยาขณะทำการจ่ายและเติมไฮโดรเจนในโลหะผสมจะสูงได้เมื่อความร้อนที่ต้องการขณะจ่ายและความร้อนที่ต้องขจัดออกขณะทำการเติมสามารถถ่ายเทเข้าและออกจากถังได้เร็วพอ เพราะหากถ่ายเทพลังงานเมื่อถ่ายเทพลังงานความร้อนไม่ทันกับที่ปฏิกิริยาต้องการ การจ่ายหรือเติมไฮโดรเจนจะหยุดลง ดังนั้นถังเก็บจะต้องมีคุณสมบัติในการนำความร้อนที่ดี ในแง่ของการออกแบบ ถังเมทัลไฮไดรด์ก็คือถังความดันชนิดหนึ่ง และอาจมองเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย โดยทำหน้าที่ส่งผ่านความร้อนจากผนังของถังเก็บไปยังตัวโลหะผสมที่ใช้เก็บไฮโดรเจน

จากค่าเอนทาปี ΔH_f^o ของปฏิกิริยา เวลาของการบรรจุและจ่ายไฮโดรเจนที่ต้องการรวมทั้งตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนและปริมาณไฮโดรเจนที่ต้องการเก็บตามที่คำนวณออกแบบไว้ จะเป็นตัวระบุถึงขนาดภายนอกของถังเก็บ แต่ปัญหาหลักที่แท้จริงอยู่ที่ตัวเมทัลไฮไดรด์ เนื่องจากในสภาวะที่เป็นโลหะผสมหรือยังไม่ทำการบรรจุไฮโดรเจน ค่าการนำความร้อนของโลหะผสมจะสูง เมื่อนำโลหะผสมบรรจุลงในท่อโดยโลหะผสมจะอยู่ในรูปผงที่มีขนาดเล็กมาก ค่าการนำความร้อนของผงโลหะผสมจะลดลงอย่างมากและเมื่อผ่านการเติมไฮโดรเจนไปบางส่วนแล้ว ผลจากเกิดไฮโดรด์จะทำให้ค่าการนำความร้อนลดลงอีก จะเห็นได้ว่าความสามารถนำความร้อนจะน้อยลงเมื่อต้องการให้การถ่ายเทความร้อนเกิดมากขึ้น ดังนั้นการพัฒนาให้ค่าการนำความร้อนของเมทัลไฮไดรด์สูงขึ้นจึงเป็นปัญหาหลักของการทำถังเก็บค่าการส่งผ่านความร้อนระหว่างเม็ดโลหะจะดีขึ้นเมื่อทำการอัดให้แน่นก่อนจนเม็ดโลหะผสมมีการเสียรูปไป ดังนั้นค่าความแข็ง และคุณสมบัติในการเสียรูปของเม็ดโลหะผสมจะเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อความสามารถในการนำความร้อนด้วย

สำหรับโลหะผสมหลายชนิดที่อยู่ในรูปผลึกที่แข็งและเปราะมาก เมื่อถูกอัดด้วยความดันสูง 100 kN/cm^2 จะมีการเสียรูปที่ผิวสัมผัสน้อยมาก และค่าการนำความร้อนก็เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่จะได้ค่าความหนาแน่นพลังงานต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.1 ความสามารถในการนำความร้อนของ TiFe , Mg_2Ni และไฮโดรเจน

สาร	ความดันของไฮโดรเจน (bar)	λ (W/m·K)	
TiFe (ที่ยังไม่ถูก	1	1.28	
กระตุ้น)	5.1	1.35	T = 298 K
	20.4	1.61	
	34	1.77	
Mg_2NiH_4	1	0.56	
	5	0.61	T = 298 K
	35	0.65	
H_2 ในรูปแก๊ส	1	0.19	

Daimler – Benz ได้พัฒนาวิธีการเพิ่มค่าการนำความร้อนโดยการเติมโลหะที่มีค่าการนำความร้อนสูงลงไปในเนื้อโลหะผสมจากนั้นจะอัดจนโลหะที่เติมมีการเสียรูป เช่น ผงโลหะจำพวกอะลูมิเนียม ซึ่งนิยมใช้เติมลงในเมทัลไฮไดรด์ที่เป็นแบบเคลื่อนที่ได้ (ใช้ในรถยนต์เพื่อให้มีน้ำหนักเบา) ส่วนถังเก็บแบบเมทัลไฮไดรด์แบบใช้งานอยู่กับที่ ซึ่งไม่ต้องคำนึงถึงน้ำหนักมากนัก สามารถเลือกใช้ทองแดงเป็นสารเติมได้

ตารางที่ 3.2 ความสามารถในการนำความร้อนสำหรับโลหะชนิดต่าง ๆ

โลหะ	λ (W/m·K)
Al	237
Cu	398
Au	315
Fe	80
Mg	159
Ni	90
Ag	427

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 ความสามารถในการนำความร้อนของ TiFe กับโลหะที่เติมเพื่อเพิ่มความสามารถในการนำความร้อน ซึ่งถูกอัดด้วยความดัน 2.8 kbar

สาร	λ (W/m•K)	
TiFe	1.45	
TiFe + 5% Al	6.14	T = 298 K
TiFe + Mg-Matrix	10.84	

การใช้อะลูมิเนียมเป็นสารเติมจะมีข้อได้เปรียบดังต่อไปนี้

1. ความสามารถในการนำความร้อนสูง
2. มีคุณสมบัติพลาสติกสูง จึงสามารถขึ้นรูปได้ดี
3. มีน้ำหนักจำเพาะต่ำ
4. มีค่าความร้อนจำเพาะสูง
5. มีราคาถูก

ในการเลือกใช้โลหะเติมจะต้องทำการศึกษาผลข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นด้วย เช่น การใช้อะลูมิเนียมอาจเกิดปัญหาการแพร่ของอะลูมิเนียมเข้าไปในเนื้อโลหะผสมได้ และทำให้โลหะผสมเสียคุณสมบัติไป เนื่องจากจุดหลอมเหลวที่ต่ำของอะลูมิเนียม จะทำให้อะลูมิเนียมแพร่เข้าไปในเนื้อโลหะผสมขณะทำการ Activate ถังเมทัลไฮโดรด์ได้

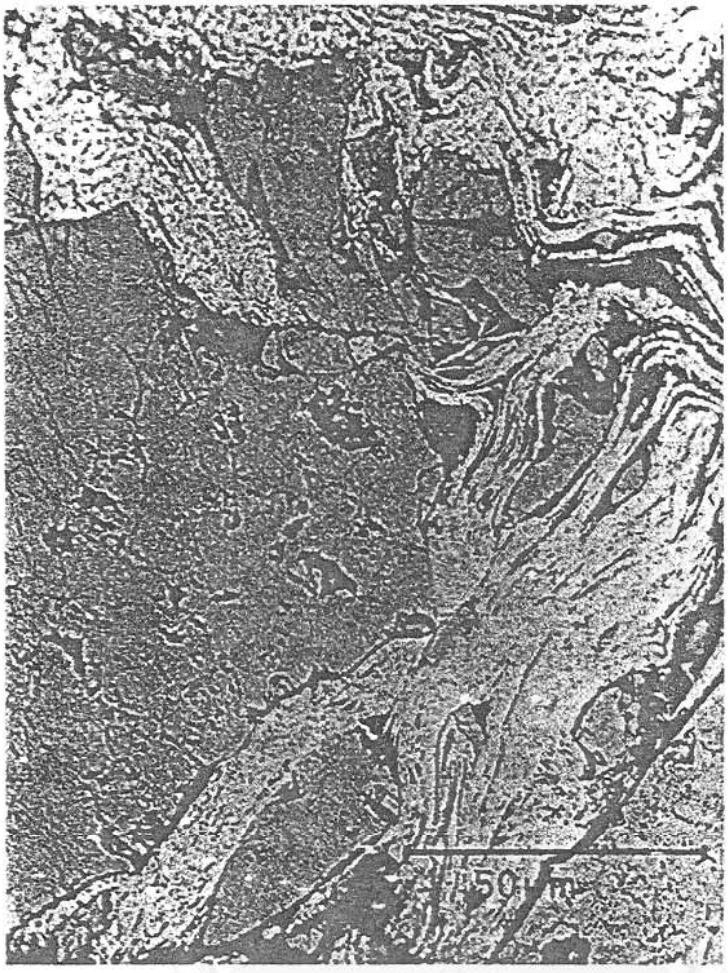
การเติมอะลูมิเนียมลงในโลหะผสมจะมีผลดีในระยะยาวต่อถังเก็บ คือ ช่วยให้ผิวของโลหะผสมไม่ถูกออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาจนทำให้เฉื่อยได้โดยง่าย เนื่องจากอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดีมาก (Affinitate) สำหรับการเลือกวัสดุเพื่อเป็นสื่อการนำความร้อน วัสดุที่เลือกใช้ควรอยู่ในรูปผงหรือเกล็ดเล็ก ๆ แต่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดเม็ดโลหะผสมเล็กน้อย ซึ่งเมื่อนำไปอัดให้เกิดการเสียรูป จะได้พื้นผิวของสารเติมขนาดใหญ่ ซึ่งครอบคลุมถึงโลหะผสมเม็ดอื่น ๆ จะทำให้ได้ค่าการนำความร้อนที่ดีขึ้น เพราะแม้ว่าเส้นทางการนำความร้อนระหว่างเม็ดโลหะผสมจะยาวขึ้น แต่ค่าการนำความร้อนก็จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อนของโลหะผสม ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าการนำความร้อนโลหะผสมที่เติมอะลูมิเนียมจะสูงขึ้นจากเดิมประมาณ 6 เท่า

สำหรับวิธีการผลิตถังเมทัลไฮไดรด์ที่มีค่าการนำความร้อนที่ดี มีใช้กันอยู่ 2 วิธี คือ

1. บรรจุผงโลหะผสมลงในท่อบรรจุแล้วอัดโดยตรง
2. กดอัดผงโลหะผสมจนเป็นแผ่นแล้วบรรจุลงท่อ

ในขณะที่โลหะผสมรับไฮโดรเจนเข้าไปเก็บไว้ ตัวโลหะผสมจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ทำให้ด้านนอกของผิวโลหะผสมขยายตัวออกไปชนกับผนังของถังเก็บ ส่วนด้านในก็จะขยายตัวจนอัดกับผนังท่อที่แก๊สไฮโดรเจนไหลผ่าน ทำให้ได้ค่าการนำความร้อนที่สูงขึ้น และโดยการเติมโลหะอื่นที่ช่วยด้านการนำความร้อน เช่น อะลูมิเนียม หรือ ทองแดง ซึ่งเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา จะทำให้มวลของถังลดลง แม้ว่าค่าความจุพลังงานของถังจะลดลงบ้าง อะลูมิเนียมที่เติมจะไม่มีผลข้างเคียงต่อ TiFe แต่

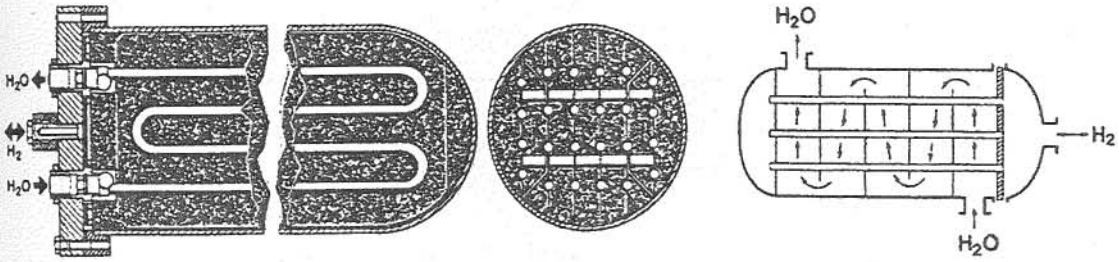
Mg_2Ni ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูงจะเกิดปฏิกิริยากับอะลูมิเนียม ดังนั้น สำหรับ Mg_2Ni และ MgH_2 โลหะที่เติมจะต้องเป็นทองแดงเท่านั้น เนื่องจากจะไม่เกิดปฏิกิริยากับ Mg_2Ni และ MgH_2 ที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 3.5 ภาพที่ได้จากการขัดผิว สีเข้มเป็นไฮไดรด์ที่ถูกอัดแน่น ส่วนสีอ่อนเป็นอะลูมิเนียม 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งแขนงของอะลูมิเนียมจะบอกถึงความสามารถในการนำความร้อนได้ดี

จากรูปที่ 3.5 แสดงเกรนของโลหะผสม TiFe + 5% Al ซึ่งการมีอะลูมิเนียมเป็นสารเจือปน ในขณะที่มันดูดซับไฮโดรเจนไว้ จะทำให้เกิดโครงข่าย (Matrix) ที่มีเสถียรภาพห่อตัวโลหะผสมไว้ และจะเห็นรอยแยกเล็ก ๆ (Micro crack) ซึ่งเกิดจากการขยายและหดตัวของเมทัลไฮไดรด์ที่มีความเปราะสูงในขณะเติมและจ่ายไฮโดรเจน ตามลำดับ โดยรอบของเกรนเมทัลไฮไดรด์จะสังเกตเห็นโครงข่ายของอะลูมิเนียมที่มีลักษณะเป็นตาข่ายสีขาวอยู่ทั่วไป

การเกิดโครงข่ายของโลหะเจือปนพวกอะลูมิเนียม และทองแดง จะทำให้ได้ค่าการนำความร้อนภายในตัวเมทัลไฮไดรด์ที่ค่อนข้างคงที่ตลอดทุกช่วงความจุของไฮโดรเจนในเมทัลไฮไดรด์ คือ ค่าการนำความร้อนไม่ขึ้นกับปริมาณไฮโดรเจนที่แทรกอยู่ในเนื้อโลหะผสม ค่าการนำความร้อนที่ค่อนข้างคงที่นี้จะทำให้สามารถคำนวณออกแบบถังเก็บได้ง่ายขึ้น



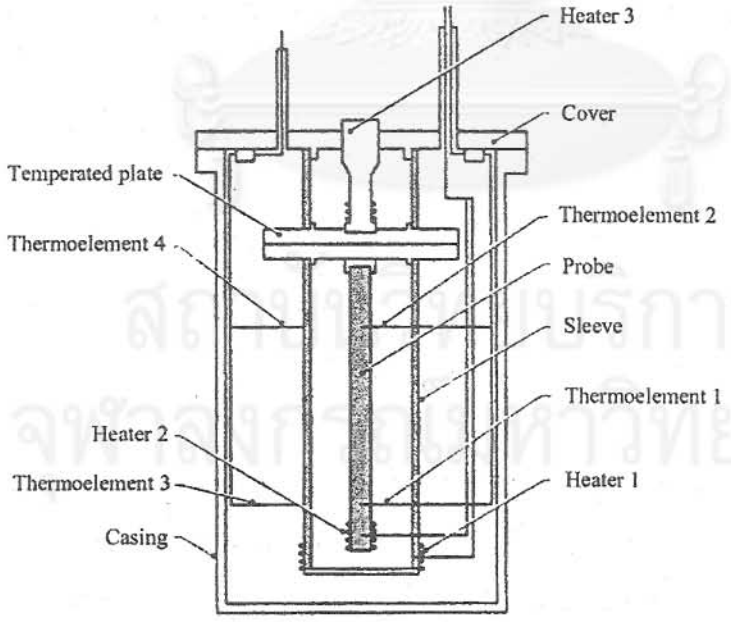
(ก) (ข)

รูปที่ 3.6 ถังเมทัลไฮไดรด์ 2 แบบ (ก) มีระบบถ่ายเทความร้อนแบบภายใน (ข) มีระบบถ่ายเทความร้อนแบบภายนอก

การใส่โลหะเติมลงในโลหะผสมจะให้ผลดี ดังต่อไปนี้

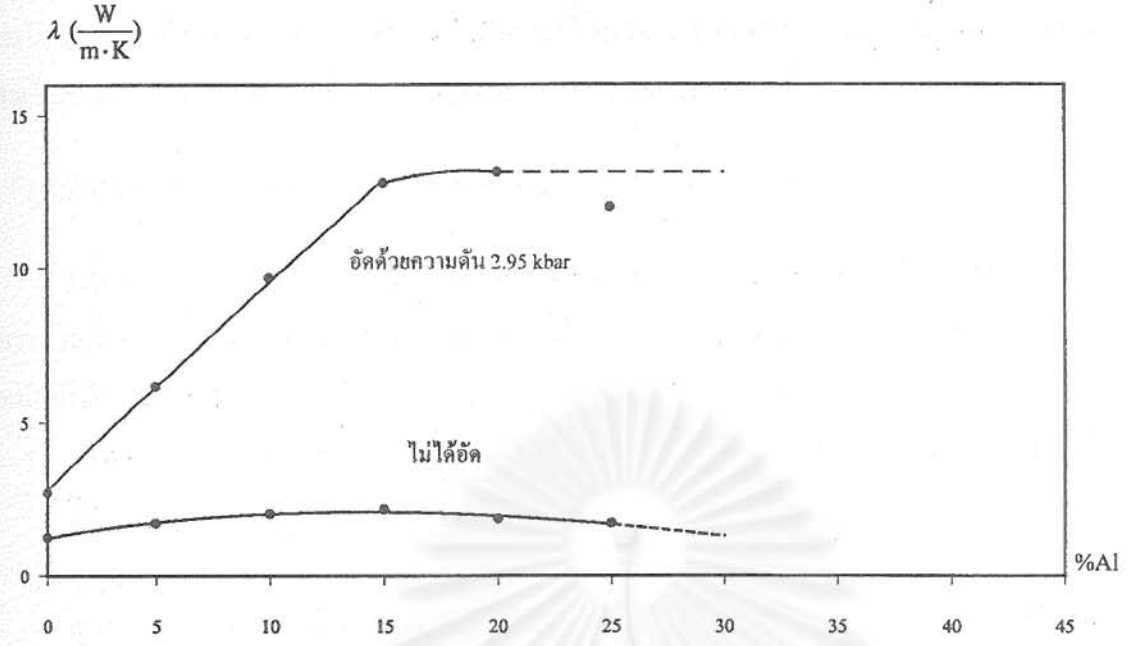
1. ค่าการนำความร้อนของเมทัลไฮไดรด์สูงขึ้น และค่อนข้างคงที่
2. ความเร็วของปฏิกิริยาบรรจุ และจ่ายไฮโดรเจนดีขึ้น
3. สามารถออกแบบถังเก็บให้มีพื้นที่ส่งผ่านความร้อนน้อยลงได้ หรือ ใช้ครีบความร้อนน้อยลง
4. การบรรจุ และจ่ายไฮโดรเจนรวดเร็วขึ้น

จากมุมมองนี้ จะพบว่าความเร็วในการบรรจุไฮโดรเจนลงถังเก็บจะมีความสำคัญมากสำหรับการใช้แบบเคลื่อนที่ได้ในรถยนต์ ซึ่งเงื่อนไขที่สำคัญสำหรับการพัฒนา คือ การเพิ่มค่าการนำความร้อนโดยโลหะเติม , การอัดผงเมทัลไฮไดรด์ลงถังเก็บด้วยความดันสูง และการพัฒนาขนาดและรูปร่างของเกรนโลหะผสม



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดความสามารถในการนำความร้อน

ผลการทดลองวัดค่าการนำความร้อนของ TiFe โดยเติมอะลูมิเนียมที่อัตราส่วนต่าง ๆ และมีการกดอัดผงโลหะผสมลงถังเก็บที่ความดันต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ค่าการนำความร้อนของ TiFe โดยมีส่วนผสมของอะลูมิเนียมที่ความดันอัดแน่น

ผิวสัมผัสของโลหะผสมจะเป็นตัวกำหนดจำนวนรอบในการใช้งาน สำหรับกรณีที่ใช้ไฮโดรเจนไม่บริสุทธิ์มาก เมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลานาน ปริมาณไฮโดรเจนที่เก็บได้จะลดลง เนื่องจากโลหะผสมจะมีการแตกตัวเป็นองค์ประกอบย่อย ๆ เช่น TiFe จะแยกออกเป็น Ti กับ Fe ซึ่ง Fe เพียงตัวเดียวไม่สามารถรวมตัวกับไฮโดรเจนได้

นอกจากนี้ จำนวนรอบการใช้งานของเมทัลไฮไดรด์ยังขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของไฮโดรเจนที่ใช้ด้วย ซึ่งสภาพผิวของโลหะผสมจะเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อจำนวนครั้งของการบรรจุใช้งาน แต่การใช้งานเมทัลไฮไดรด์ภายใต้ไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์ก็สามารถมีจำนวนครั้งที่จำกัดได้เช่นกัน เนื่องจากโลหะผสมจะเกิดการแตกตัวเป็นองค์ประกอบย่อย ๆ ที่ไม่สามารถรวมตัวกับไฮไดรเจนได้

ตัวอย่างของโลหะผสม TiFe สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ 3 แบบ ดังนี้

$$TiFe + H_2 \rightleftharpoons TiFeH_2 \qquad -30\ kJ/mol_{H_2} \qquad (3.6)$$

$$TiFe + H_2 \rightleftharpoons TiH_2 + Fe \qquad -45\ kJ/mol_{H_2} \qquad (3.7)$$

$$TiFe + H_2 \rightleftharpoons TiH_2 + TiFe_2 \qquad -80\ kJ/mol_{H_2} \qquad (3.8)$$

Reilly ได้ทำการทดลองกับโลหะผสมของ TiFe พบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C และความดันต่ำกว่า 50 bar โลหะผสมชนิดนี้จะไม่เกิดการแตกตัวเป็นองค์ประกอบย่อย โดยเฉพาะโมโนไฮไดรด์ TiFeH พบว่า หลัง 30,000 รอบใช้งาน ความจุของไฮโดรเจนจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อความดันของไฮโดรเจนเกินกว่า 100 bar และอุณหภูมิสูงกว่า 150°C โลหะผสมชนิดนี้จะเริ่มมีการแตกตัวเป็นองค์ประกอบย่อย ซึ่งการแตกตัวของโลหะผสมนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากโดยทั่วไป เมทัลไฮไดรด์ส่วนมากมี

แนวโน้มเกิดการแตกตัวเป็นองค์ประกอบย่อยที่ความดันและอุณหภูมิสูง มีโลหะผสมน้อยชนิดเท่านั้นที่จะเกิดการแตกตัวเป็นองค์ประกอบย่อยที่อุณหภูมิและความดันใช้งานทั่วไป

3.7 มุมมองด้านความปลอดภัยของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์

เนื่องจากการเก็บไฮโดรเจนในรูปของเมทัลไฮไดรด์ เป็นการเก็บในรูปปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นจึงมีความปลอดภัยสูงกว่าถังเก็บแบบความดันสูง หรือถังเก็บแบบไฮโดรเจนเหลว ถังเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูง และอุณหภูมิใช้งานต่ำมีความแตกต่างในแง่ความปลอดภัยดังนี้

- เนื่องจากพันธะทางเคมีของเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูงจะมีเสถียรภาพสูง ดังนั้น จึงมีความปลอดภัยสูงกว่าเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำ
- อุณหภูมิใช้งานของเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูง (สูงกว่า 300°C) มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิใช้งานของเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำ (20 - 30°C) ดังนั้นเมื่อมีการรั่วของถังและได้รับการสัมผัสกับอากาศ เมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูงจะเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงกว่ามาก

ตัวอย่างทางด้านความปลอดภัยของถังเมทัลไฮไดรด์

สำหรับถังขนาด 100 ลิตรที่บรรจุเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำ ซึ่งอยู่ในรูปอัดแน่นเป็นแผ่นมีความหนาแน่นประมาณ 4.5 kg/l และมีรูพรุนประมาณ 20% น้ำหนักรวมประมาณ 450 kg สามารถบรรจุไฮโดรเจนได้ 9 kg (2% โดยน้ำหนัก) คิดเป็น 100 m^3 ในขณะเกิดการรั่วจะมีไฮโดรเจนในถัง 1m^3 ที่สามารถติดไฟได้ทันที คิดเป็นค่าความร้อนเทียบเท่าเบนซิน 0.25 ลิตร ซึ่งน้อยมาก ส่วนไฮโดรเจนที่เหลือประมาณ 99 m^3 จะอยู่ในรูปเมทัลไฮไดรด์ และจะจ่ายออกมาได้เมื่อได้รับความร้อนจากสิ่งแวดล้อมเข้าไปเพียงพอ แต่เนื่องจากขณะถังบรรจุชำรุด ชุดอุปกรณ์ส่งถ่ายความร้อนอาจเสียหายไปด้วยทำให้ไฮโดรเจนไม่สามารถจ่ายออกมาได้ในปริมาณมาก โดยอุณหภูมิและความดันภายในถังจะลดลงอย่างต่อเนื่องและปริมาณของไฮโดรเจนที่จ่ายออกก็จะลดลงตาม นอกจากนั้น หากมีอากาศจากภายนอกรั่วเข้าไปสัมผัสผิวของเมทัลไฮไดรด์ ก็จะทำให้ผิวของโลหะผสมเสื่อมสภาพ และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อีก ดังนั้นไฮโดรเจนที่เหลือก็จะค้างอยู่ภายในโลหะผสมไม่สามารถจ่ายออกจากถังได้อีก จึงไม่เกิดการระเบิดเช่นกรณีถังเก็บแบบความดันสูงหรือไฮโดรเจนเหลว

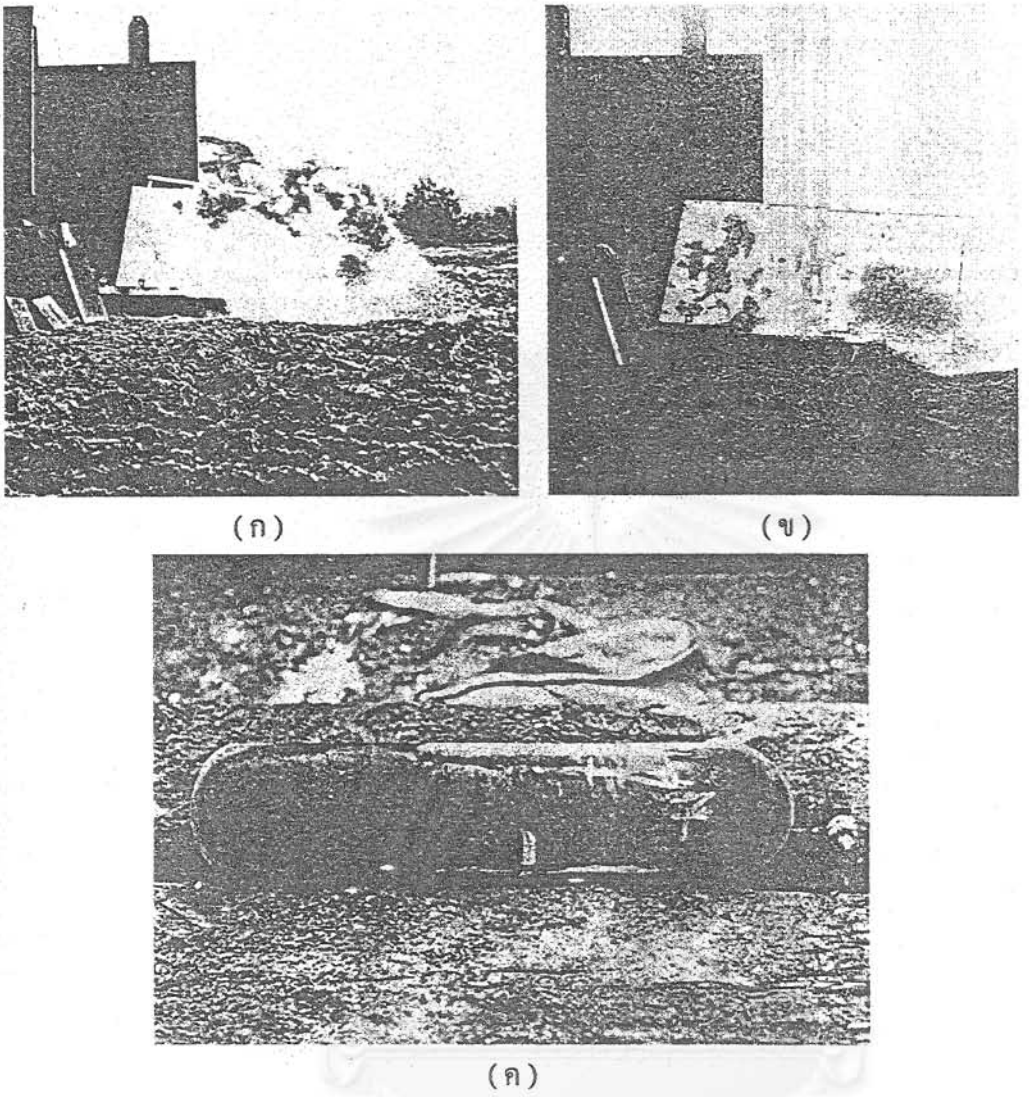
ความดันใช้งานของถังเมทัลไฮไดรด์โดยทั่วไปจะอยู่ที่ 5 และ 10 bar ขณะที่ทำการจ่ายไฮโดรเจนออกจากถัง จะมีไฮโดรเจนอยู่ในสถานะก๊าซที่พร้อมจะติดไฟเพียงแค่ 0.1 - 0.2% เท่านั้น ซึ่งปริมาณแก๊สจำนวนนี้จะมีค่าพลังงานความร้อนเพียง 1,000 - 2,000 kJ ซึ่งคิดเป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากเบนซินเพียง 20 - 50 cc เท่านั้น

เมทัลไฮไดรด์ไม่เพียงแต่จะมีความปลอดภัยกว่าถังเก็บแบบความดันสูงหรือไฮโดรเจนเหลวเท่านั้น ถังเมทัลไฮโดรด์ยังมีพฤติกรรมทางด้านความปลอดภัยที่ดีกว่าถังเชื้อเพลิงแบบอื่น ๆ ใน

ปัจจุบันอีก ซึ่งจากการทดลองยิงถังเมทัลไฮไดรด์ด้วยกระสุนปืนของ Dei am Denver Reserch Institute และ Daimler – Benz เพื่อดูพฤติกรรม ได้ผลการทดสอบเทียบกับถังน้ำมันเบนซินดังนี้

- ที่บริเวณรอยกระสุนเข้าและออกจะมีเปลวไฟเกิดขึ้น
- เปลวไฟที่เกิดขึ้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว และสามารถดับให้ดับได้ด้วยมือ
- การจ่ายไฮโดรเจนไปยังบริเวณเปลวไฟจะทำให้ส่วนอื่น ๆ ของถังเมทัลไฮไดรด์ถูกดูดความร้อนไป จนทำให้ผิวโดยรอบมีอุณหภูมิต่ำลงจนเกิดมีน้ำแข็งเกาะรอบ ๆ ถังยกเว้นบริเวณเปลวไฟ ทำให้สามารถจับต้อง และเคลื่อนย้ายออกได้โดยปลอดภัย
- หากท่อส่งไฮโดรเจนเข้าสู่เครื่องยนต์ไม่ชำรุด ไฮโดรเจนก็ยังคงสามารถจ่ายไปยังเครื่องยนต์ได้ ทำให้สามารถขับรถออกมายังบริเวณที่ปลอดภัยได้สำหรับถังเบนซินจะตรงข้าม จะมีการระเบิดหลังถูกยิง และมีเปลวไฟเกิดขึ้นอย่างรุนแรง
- เนื่องจากไฮโดรเจนมีความเร็วในการฟุ้งกระจายสูง และเป็นแก๊สที่เบาที่สุด จึงลอยสูงขึ้นและทำให้ส่วนผสมของไฮโดรเจนกับอากาศในบริเวณนั้นเจือจางอย่างรวดเร็วจนไม่สามารถเกิดการระเบิดขึ้นได้ สำหรับถังเบนซินจะตรงข้าม จะมีการระเบิดหลังถูกยิง และมีเปลวไฟเกิดขึ้นอย่างรุนแรง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

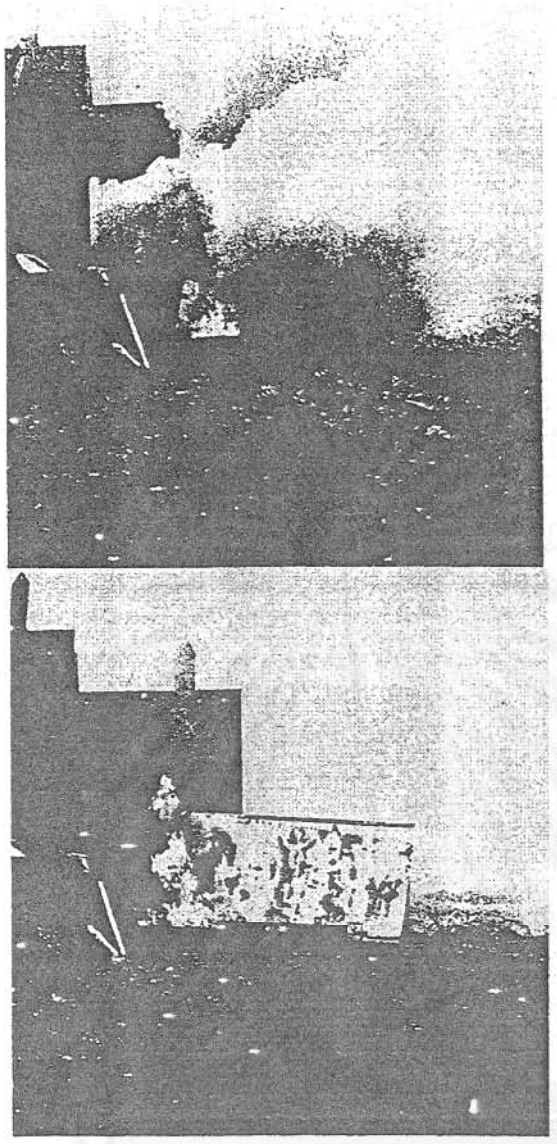


(ก) (ข)

(ค)

รูปที่ 3.9 ผลการยิงทดสอบถัง TiFe-Hydride (ก) ทันทีหลังการยิง (ข) 30 วินาทีหลังการยิง (ค) 10 นาทีหลังการยิง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

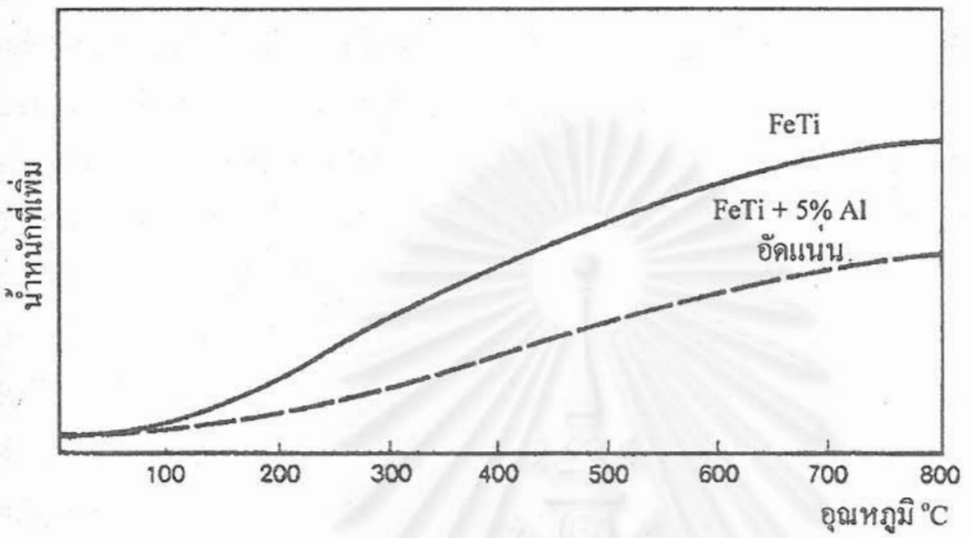


(ก) (ข)

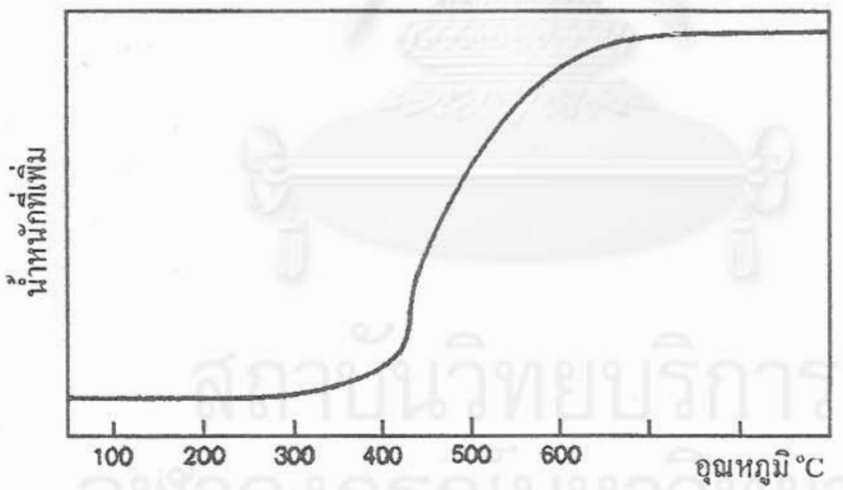
รูปที่ 3.10 ผลการยิงทดสอบถังเบนซิน (ก) ทันทีหลังการยิง (มีควันและเปลวไฟเกิดขึ้นอย่างรุนแรง)
(ข) 5 – 10 นาทีหลังจากการยิง (ควันและเปลวไฟลดลง)

แม้ว่าพันธะยึดเหนี่ยวทางเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับโลหะผสมจะให้ความปลอดภัยค่อนข้างสูง แต่ตัวโลหะผสมเองก็ยังมีปัญหาทางเทคนิคเกี่ยวกับความปลอดภัย เนื่องจากผงโลหะที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสค่อนข้างสูงจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้ดี แต่ในทางตรงข้ามก็เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ดีเช่นกัน ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของผงโลหะผสมในอากาศไม่เพียงแต่เกิดขึ้นอย่างฉับพลัน แต่ยังก่อให้เกิดความร้อนสูง ทำให้อันตรายจากถังเมทัลไฮไดรด์ที่แท้จริงไม่ได้เกิดจากไฮโดรเจน แต่เกิดจากตัวโลหะผสมเอง ทำให้เมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูงมีอันตรายกว่า เนื่องจากมีเกรนที่มีขนาดเล็กกว่า จึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศได้รุนแรงกว่า ซึ่งปัญหานี้อาจแก้ได้โดยใช้อะลูมิเนียมที่ผสมคลุมจับเกรนหรือผงของโลหะผสมไว้เป็นก้อนไม่ให้สัมผัสกับอากาศมากนัก

รูปที่ 3.11 และ รูปที่ 3.12 แสดงพฤติกรรมของ TiFe และ TiZrCrMn ที่อยู่ในรูปผงและรูปที่อัดแน่นที่มีต่ออากาศซึ่งวิเคราะห์จากเครื่อง DTA (Differential Thermo Analyze) โดยอาศัยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างเพื่อหาการเริ่มต้นของปฏิกิริยาออกซิเดชัน ระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยา และความเร็วของปฏิกิริยา



รูปที่ 3.11 อุณหภูมิติดไฟด้วยตัวเองของ TiFe-Hydride ที่อัดแน่น (+ 5% Al) และไม่ได้อัดแน่น



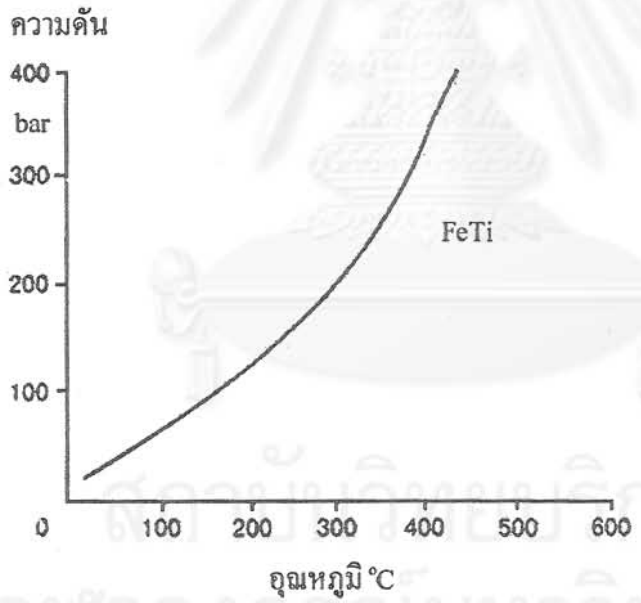
รูปที่ 3.12 อุณหภูมิติดไฟด้วยตัวเองของ TiZrCrMn-Hydride (+ 5% Al) ในสภาวะอัดแน่น

จากรูปที่ 3.11 ผง TiFe ที่มีขนาดเล็กกว่า 30 ไมโครเมตร มีอุณหภูมิติดไฟได้เองตั้งแต่ 150°C และ TiZrCrMn ที่มีขนาดเล็กกว่า 30 ไมโครเมตร และสามารถติดไฟได้เองตั้งแต่อุณหภูมิห้องและการติดไฟจะเกิดขึ้นอย่างฉับพัน และรุนแรง

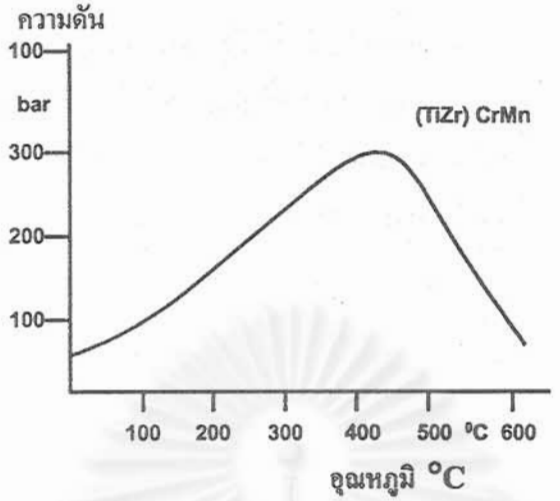
จากรูปที่ 3.12 เมื่อนำโลหะผสมที่อยู่ในรูปผงมาเพิ่มอะลูมิเนียม 5% โดยน้ำหนักและนำไปอัดแน่นให้มีรูปร่างที่แน่นอน(เช่น เป็นแผ่น) จะมีผลดีคือ โลหะผสมจะมีอุณหภูมิติดไฟได้เองสูงขึ้น

เช่น TiFe จะติดไฟได้เองที่อุณหภูมิมากกว่า 450°C และ TiZrCrMn จะติดไฟได้เองที่อุณหภูมิมากกว่า 400°C นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะช้าลง และไม่เกิดการร้อนแดงของโลหะอย่างรวดเร็ว แม้ว่าส่วนที่ร้อนแดงจะมีการลุกไหม้แต่ก็สามารถใช้น้ำหรือวัสดุดับเพลิงอื่นดับไฟได้

ปัญหาด้านเทคนิคสำหรับถังเมทัลไฮไดรด์ที่ใช้ในรถยนต์จะเป็นกรณีพิเศษ คือมีปัญหาเกี่ยวกับพฤติกรรมของถังเมทัลไฮไดรด์ที่ปิดและไม่มีการจ่ายไฮโดรเจนแต่มีการนำความร้อนเข้าที่อุณหภูมิสูง เช่น ขณะเกิดอุบัติเหตุและมีเพลิงลุกไหม้ลามจากรถคันอื่นไปที่ถังเมทัลไฮไดรด์ ในกรณีนี้ Diamler-Benz ได้ทำการทดสอบกับถัง 2 ใบ โดยใบแรกเป็นถังบรรจุโลหะผสมของ TiFe ใบที่สองบรรจุโลหะผสมของ TiCrMn และมีสารผสมอื่นๆปน ทั้งหมดเป็นเมทัลไฮไดรด์สมบูรณ์ และมีความดัน 50 bar ของไฮโดรเจนที่เติมอยู่ภายใต้เปลวไฟของเบนซิน อุณหภูมิถังเมทัลไฮไดรด์และความดันของไฮโดรเจนภายในถังได้ถูกวัดและแสดงในรูปที่ 3.13 ที่อุณหภูมินอกถัง 450°C และความดันภายใน 300 bar ถังจะระเบิดอย่างรุนแรง ส่วนถังที่บรรจุโลหะผสม TiCrMn จะมีความดันสูงขึ้นอย่ารวดเร็วเช่นกัน แต่ที่ความดัน < 300 bar ถึงแม้จะมีความร้อนเข้าสู่ถัง อย่างต่อเนื่อง ความดันจะลดลงอย่ารวดเร็ว และจะเริ่มสูงขึ้นอีกเมื่อถังมีอุณหภูมิ T> 300°C แต่สุดท้ายก็จะไม่เกิน 10 bar ดังนั้นจึงมีความปลอดภัยที่สูงกว่า



รูป 3.13 กราฟแสดงความดันภายในถัง TiFe-Hydride ที่ได้รับพลังงานความร้อนจากภายนอก (การลุกไหม้ของเบนซิน)

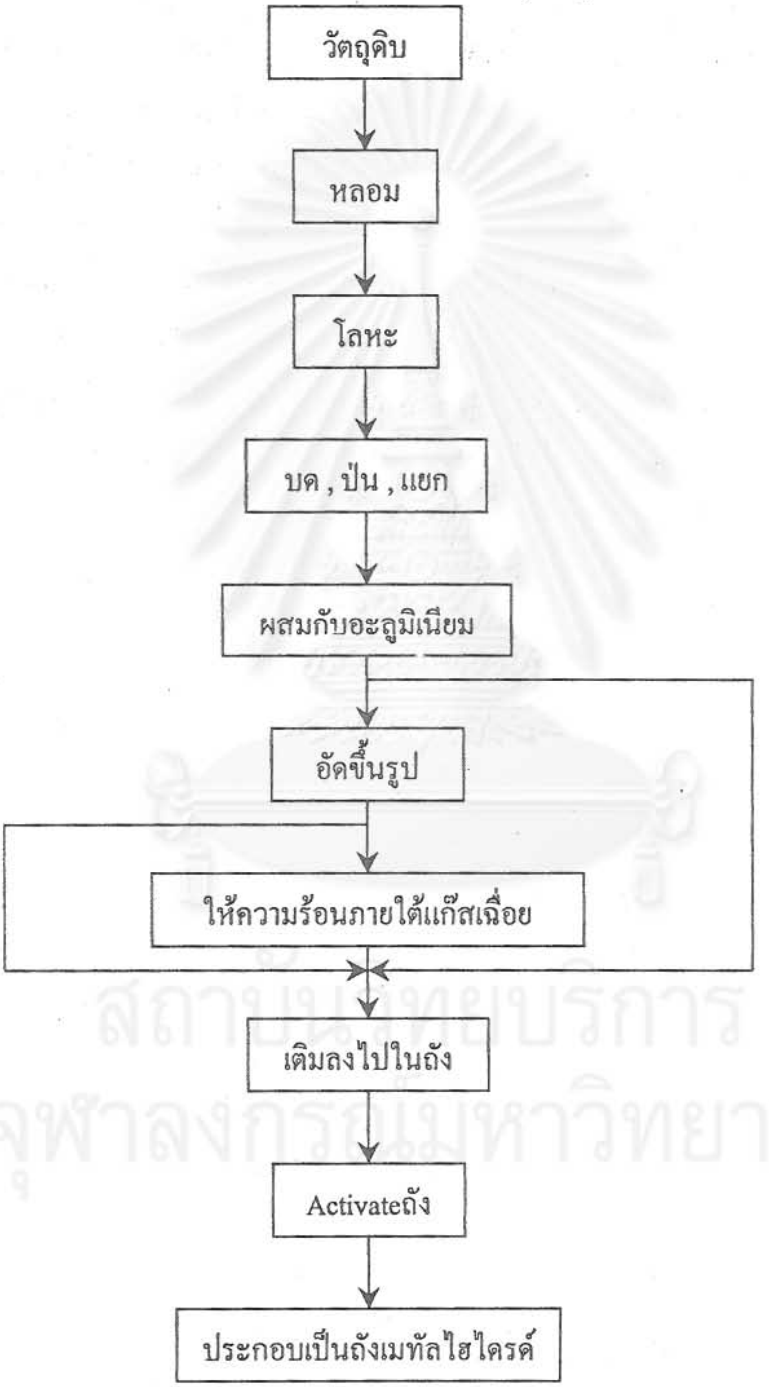


รูป 3.14 กราฟแสดงความดัน ภายในถัง Ti Zr Cr Mn-Hgdricle และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยรอบถัง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.8 ขั้นตอนการผลิตเมทัลไฮไดรด์และถังเมทัลไฮไดรด์

เทคนิคการผลิตเมทัลไฮไดรด์ในจำนวนมากได้เริ่มในปีค.ศ.1975 โดยบริษัท INCO New York และบริษัท Die Billing Corporation ซึ่งโลหะผสมที่ผลิตในขณะนั้นได้แก่ TiFe , Mg_2Ni , $LaNi_5$ และอื่น ๆ ต่อมาในปีค.ศ. 1980 ได้มีการผลิตถังเมทัลไฮไดรด์ที่เยอรมนีที่ Nurnberg ในรูป 3.15 เป็นผังแสดงการผลิตถังเมทัลไฮโดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำ



รูปที่ 3.15 แผนผังการผลิตถังเมทัลไฮไดรด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนการผลิต

1. โลหะที่เป็นวัตถุดิบจะถูกผสมและหลอมรวมเพื่อให้ได้โลหะผสมตามที่ต้องการ
2. นำโลหะผสมที่ได้มาบดละเอียดภายใต้แก๊สเฉื่อยและผ่านขบวนการแยก (ขนาดต้องเล็กกว่า 500ไมครอน)
3. เติมผงอะลูมิเนียม (หรือผงโลหะอื่นที่เป็นตัวนำความร้อนที่ดี) และอัดด้วยความดันสูงให้แน่น
4. เพื่อให้มีการนำความร้อนที่ดีขึ้นและมีผิวสัมผัสที่แนบสนิทกับผนังท่อ จึงใส่เมทัลไฮโดรด์ที่ผ่านการอัดแน่นแล้วลงในท่อโดยพ่นชั้นของอะลูมิเนียมหรือใส่อะลูมินัมฟอยล์ลงไปด้วย
5. สำหรับโลหะผสมที่ขึ้นรูปแล้วก่อนใส่ลงท่อ (ถัง) จะทำการเผาอบในเตาอบภายใต้แก๊สเฉื่อยหรือในบรรยากาศของไฮโดรเจน จากนั้นจึงใส่โลหะผสมที่ขึ้นรูป และได้ผ่านการทำความสะอาดผิวขั้นแรกแล้วลงในท่อ จากนั้นจึงทำการเชื่อมปิด
6. ในกรณีของโลหะผสมที่ได้ขึ้นรูปแล้วแต่ไม่ได้ผ่านการเผาในเตาอบ เพื่อทำความสะอาดผิวของโลหะผสม หลังจากที่บรรจุลงในถังแล้วต้องนำถังไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อทำลายชั้นผิวที่สกปรกของโลหะผสมแต่ต้องระวังมิให้ถังบรรจุเสียรูปมากจนเกิดความเสียหายได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
การใช้งานในรถยนต์

การใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายในมีข้อดีดังต่อไปนี้

1. สำหรับเครื่องต้นกำลังของรถไฮโดรเจนที่ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง จะเป็นเครื่องยนต์เบนซินที่ดัดแปลงมาใช้กับเชื้อเพลิงไฮโดรเจน และยังคงใช้กับเบนซิน หรือ เชื้อเพลิงผสม(เชื้อเพลิงไฮโดรเจน+เบนซิน) ได้
2. กำลังต่อปริมาตรและการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงไฮโดรเจนในทางทฤษฎี จะมีค่าอยู่ระหว่างเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล
3. การสันดาปของเครื่องยนต์แก๊สไฮโดรเจนจะไม่มี CO , CO_2 , CH และไม่มีสารตะกั่วออกมากับไอเสีย เนื่องจากไฮโดรเจนมีช่วงติดไฟกว้าง โดยค่า λ (Relative air fuel ratio) มีค่ามากกว่า 2 และการสันดาปจะเกิด NO_x น้อยมาก แต่กำลังของเครื่องยนต์ก็ลดลง
4. สำหรับรถยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงผสม (เบนซิน กับ ไฮโดรเจน) อัตราส่วนของเชื้อเพลิงสามารถกำหนดได้ตามต้องการ ซึ่งในแง่นี้อาจใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงส่วนเพิ่มเติมของเบนซินเพื่อทดแทนเบนซินบางส่วน เช่น ใช้เบนซินเป็นหลักแล้วผสมไฮโดรเจนลงไป 20% เพื่อลดปริมาณการใช้เบนซิน เป็นการประหยัดการใช้เชื้อเพลิงเบนซิน ซึ่งในกรณีนี้การดัดแปลงเครื่องยนต์เบนซินเพียงเล็กน้อยก็สามารถใช้งานได้

ดังนั้นจากหลักการ รถยนต์สามารถใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนได้ ซึ่งมีประโยชน์และสามารถใช้แทนที่รถที่ใช้ไฟฟ้าได้เพื่อช่วยมลพิษ และช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงธรรมชาติเพราะไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานนิวเคลียร์

4.1 เครื่องยนต์สันดาปภายในใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

เป็นที่ทราบกันเครื่องยนต์ไฮโดรเจนมีมานานกว่า 100 ปีแล้วโดยปัจจุบันในประเทศเยอรมนี ได้แก่ Daimler-Benz และ Motoren-Institute der Hochschulen in Aachen Kaiserslautern และ Stuttgart รวมทั้งในระดับนานาชาติก็มีการดัดแปลงเครื่องยนต์สันดาปภายใน (เครื่องยนต์เบนซิน) เพื่อใช้เป็นเครื่องยนต์ไฮโดรเจน โดยหลักการแล้วจะเป็นการดัดแปลงเครื่องยนต์สันดาปภายใน (เครื่องยนต์เบนซิน) เพื่อใช้กับเชื้อเพลิงไฮโดรเจน การผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงเกิดขึ้นได้ทั้งภายนอกและภายในกระบอกสูบ และนอกจากนี้ยังสามารถดัดแปลงใช้ได้กับเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด คือ ใช้กับเบนซินและไฮโดรเจน

การผสมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับอากาศภายนอกกระบอกสูบ จะต้องผสมให้ได้สัดส่วนที่พอเหมาะก่อน แล้วจึงให้เครื่องยนต์ดูดส่วนผสมเข้าในกระบอกสูบ โดยความดันที่ต้องการของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะอยู่ที่ 1 bar ซึ่งที่ความดันนี้สามารถใช้ถังเมทัลไฮไดรด์ทั้งชนิดอุณหภูมิใช้งานสูงและอุณหภูมิใช้งานต่ำได้ แต่การผสมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับอากาศภายนอกกระบอกสูบก็มีข้อเสีย คือ อาจเกิด Flash back และ มีการจุดระเบิดเองได้ (Autoignition) แต่ข้อเสียนี้สามารถแก้ไขให้ลดลงได้โดยลดความเข้มข้นของส่วนผสมลง และใช้วิธีการนำเอาไอเสียบางส่วนกลับเข้ามาผสมในท่อไอดี (Exhaust gas recycle) หรือโดยการพ่นละอองน้ำเข้าในกระบอกสูบ แต่การแก้ไขวิธีนี้จะมีผลทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง

การผสมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับอากาศภายในกระบอกสูบ เป็นการช่วยเพิ่มกำลังของเครื่องยนต์โดยจะดูดเอาอากาศเข้ามาในกระบอกสูบแล้วจึงฉีดไฮโดรเจนเข้าในกระบอกสูบในช่วงจังหวะอัด (วิธีการนี้จะช่วยแก้ปัญหาการจุดก่อนและปัญหา flash back ของเครื่องยนต์) ความดันที่ใช้อยู่ระหว่าง 2 - 50 bar และกำลังของเครื่องยนต์จะเพิ่มตามความดันที่ใช้ (ที่ความดัน 50 bar เครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะให้กำลังสูงกว่าเครื่องยนต์เบนซินเดิม) สำหรับความดัน 2 - 5 bar มีความเหมาะสมที่สุด เพราะเครื่องยนต์จะมีกำลังสูงเพียงพอ และยังสามารถใช้กับถังเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูงและอุณหภูมิใช้งานต่ำได้ ส่วนที่ความดัน 5 - 50 bar จะต้องใช้กับถังเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำเท่านั้น

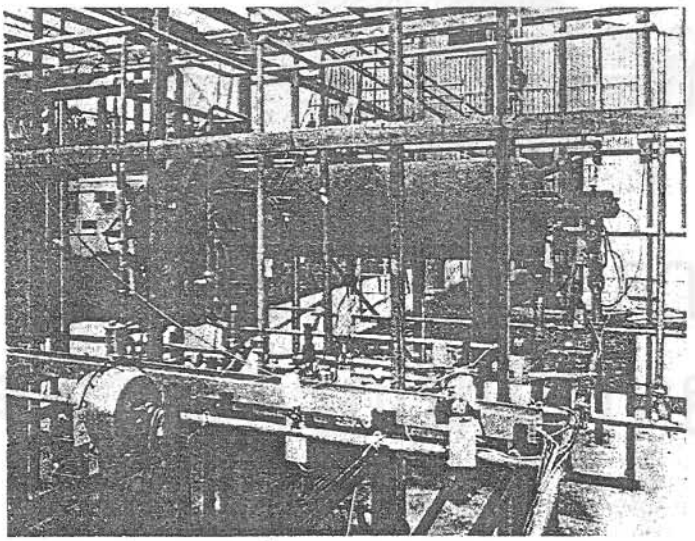
4.2 เครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้กับไฮโดรเจนและเบนซิน (ใช้เชื้อเพลิง 2 ชนิด)

การใช้เชื้อเพลิง 2 ชนิดสามารถจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนให้ผสมกับเบนซินและอากาศในท่อไอดี หรือฉีดเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเข้ากระบอกสูบได้โดยตรง ซึ่งอัตราส่วนของเบนซินกับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนนั้นมีค่าเท่าไรก็ได้ เพราะสามารถใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้อย่างไม่มีปัญหา Daimler-Benz ได้ทำการทดลองเดินเครื่องยนต์เพื่อแสดงให้เห็นว่าเครื่องยนต์สามารถทำงานได้ดีแม้ว่ามีอัตราส่วนของไฮโดรเจนสูงถึง 60% ซึ่งการแก้ปัญหานี้นับเป็นก้าวแรกในการแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานโดยลดการใช้เชื้อเพลิงเบนซินลงและยังลดมลพิษจากไอเสียด้วย ในปีค.ศ. 1977 ได้มีการร่วมมือกันระหว่าง University Kaiseslavtern โดยนำเทคนิคนี้ไปใช้กับรถยนต์นั่งขนาด 2.8 ลิตร ซึ่งเป็นเครื่องยนต์หัวฉีด โดยในขณะที่เครื่องยนต์เดินเบา (Idle) จะใช้แต่เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ผสมกับอากาศในอัตราส่วนที่บางมากทำให้มีมลพิษต่ำ ดังนั้น ขณะที่รถติดไฟแดงก็จะไม่มีมลพิษออกมา แต่ในขณะเครื่องยนต์ทำงานที่รับภาระต่ำ เครื่องยนต์จะดูดส่วนผสมที่เป็นเบนซินกับอากาศในอัตราส่วนที่บางมากจนต้องใช้ไฮโดรเจนช่วยในการจุดระเบิด ทำให้ในบางช่วงของการทำงานจะมีไฮโดรเจนมากถึง 60% และทำให้มลพิษคือ CO และ NO_x ลดลงอย่างเห็นได้ชัด

ในการทดลองการข้างต้นจะใช้เบนซิน 50 kg และเชื้อเพลิงไฮโดรเจน 4 kg ซึ่งเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะถูกเก็บในถังเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำซึ่งจะมีน้ำหนักประมาณ 200 kg สำหรับการทดลองนี้ไม่สามารถใช้ถังเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูงได้เนื่องจากถังเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูงต้องการระดับอุณหภูมิสูงกว่า 300°C ซึ่งเครื่องยนต์ในขณะทำงนที่ภาระต่ำ ๆ ไม่สามารถทำได้ (อุณหภูมิไอเสียต่ำกว่า 300°C) ทำให้ถังเมทัลไฮไดรด์ไม่สามารถจ่ายไฮโดรเจนได้ในปริมาณที่ต้องการ

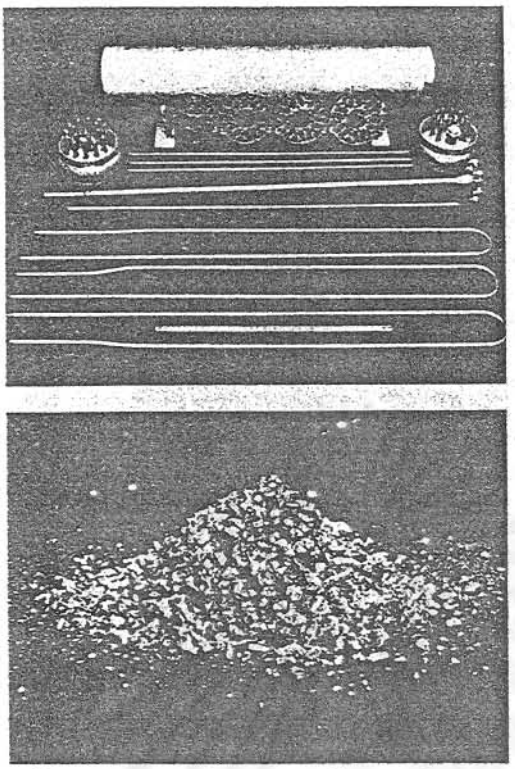
4.3 เทคโนโลยีของถังเมทัลไฮไดรด์ในรถยนต์

ถังเมทัลไฮไดรด์แบบติดตั้งอยู่กับที่ใบแรกถูกสร้างขึ้นในอเมริกา โดย Brookhaven National Labs ซึ่งมีน้ำหนักโลหะผสมสูงถึง 2,000 kg โดยการถ่ายเทความร้อนจะใช้ท่อเล็ก ๆ ฝังอยู่ภายในโลหะผสม (เรียกว่าระบบการถ่ายเทความร้อนแบบภายในโลหะผสม) ส่วนถังเมทัลไฮไดรด์ที่ใช้ในรถยนต์ได้ถูกพัฒนาโดย Billings Corporation และ bei MPD/Engineer ซึ่งจะมีลักษณะเป็นท่อเล็ก ๆ ภายในบรรจุโลหะผสม ส่วนผิวท่อด้านนอกจะใช้ในการถ่ายเทความร้อน (เรียกว่าระบบถ่ายเทความร้อนแบบภายนอก) ทั้ง 2 กรณีพื้นผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนต้องถูกออกแบบให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ในปริมาณที่ต้องการและจากการกำหนดเงื่อนไขทางเทคนิค เช่น ปริมาณพลังงานที่เก็บในถัง อัตราการไหลของไฮโดรเจน (ภาระสูงสุดของถังที่สามารถรับได้) เวลาที่ใช้ในการบรรจุไฮโดรเจน และ สามารถติดตั้งในรถยนต์ได้ สิ่งเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดให้ถังเก็บมีรูปร่างต่างกันออกไป



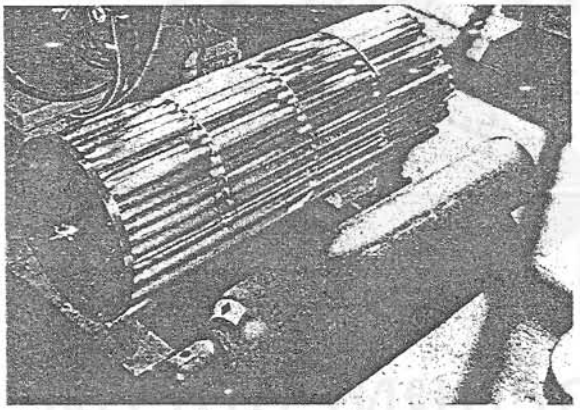
รูปที่ 4.1 ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์แบบอยู่กับที่ โดยใช้ระบบถ่ายเทความร้อนภายใน ปริมาณโลหะผสมประมาณ 2 ตัน $TiFe_{0.9}Mn_{0.1}$

ภาพจาก Brookhaven National Laboratory , USA



รูปที่ 4.2 ภาพแสดงอุปกรณ์สำหรับระบบถ่ายเทความร้อนภายในถังเมทัลไฮไดรด์ ภาพล่างเป็นเมทัลไฮไดรด์

ภาพจาก Brookhaven National Laboratory , USA



รูปที่ 4.3 ถังเมทัลไฮไดรด์ในรูปประกอบด้วยท่อขนาดเล็กจำนวนมาก การแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้นที่ภายนอก ผ่านผิวของท่อเล็ก ๆ

ภาพจาก Ergenics/MPD , Great Britain

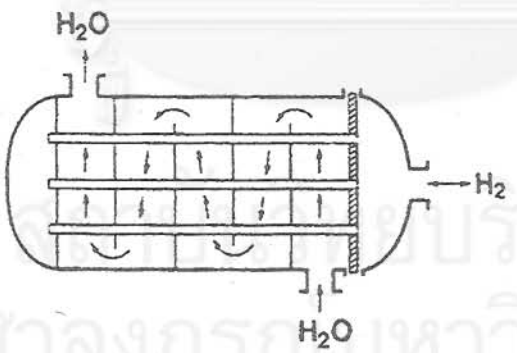
ในด้านพื้นฐานการออกแบบถังเมทัลไฮไดรด์นั้น การที่ถังเมทัลไฮไดรด์มีพลังงานจำเพาะต่ำอยู่ที่ 500 - 1,000 W.h/kg เพื่อให้ได้ระยะทางขับเคลื่อนเท่ากับรถยนต์ที่ใช้เบนซินหรือดีเซลจะต้องใช้ถังเมทัลไฮไดรด์ที่มีน้ำหนักมากเช่น ถังเมทัลไฮไดรด์ที่มีน้ำหนัก 500 - 1000 kg จะเทียบเท่าถังน้ำมันเบนซินเพียง 50 kg ด้วยเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ คือ ราคาของถังจะสูงขึ้นถ้าถังเก็บมีขนาดใหญ่ขึ้นใช้โลหะผสมในปริมาณที่สูงและเหตุผลทางด้านพลังงาน คือเมื่อถังมีน้ำหนักมากขึ้นจะไปเพิ่มค่า

ความต้านทานในการขับเคลื่อนและทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูง ดังนั้นถังเมทัลไฮไดรด์ควรมีน้ำหนักอยู่ที่ 100 - 200 kg ซึ่งที่น้ำหนักขนาดนี้จะเทียบเท่ากับการใช้เบนซินเพียง 5 - 10 kg (ทั้งนี้ขึ้นกับโลหะผสมที่ใช้ทำถังเมทัลไฮไดรด์ด้วย) ดังนั้นรถยนต์ที่จะนำมาดัดแปลงเป็นรถยนต์ไฮโดรเจนควรจะเป็นรถยนต์ที่ถูกออกแบบมาให้ประหยัดพลังงานอยู่ก่อนแล้ว (เช่น รถยนต์ขนาดเล็ก) เพื่อให้ได้สามารถวิ่งได้ระยะทาง 150 km โดยใช้ถังที่มีน้ำหนักเพียง 100 kg

รถยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนและมีถังเก็บเป็นถังแบบเมทัลไฮไดรด์เหมาะกับการเดินทางระยะสั้นประมาณ 150 - 200 km และหากต้องการใช้งานระยะไกลควรใช้รถยนต์เบนซินหรือดีเซลจะเป็นการเหมาะสมกว่า

ความร้อนที่ได้จากการสันดาปไฮโดรเจนกับอากาศในเครื่องยนต์ 20% จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถยนต์ (Mechanical energy) ส่วนอีก 80% เป็นพลังงานความร้อนในกระบอกสูบที่ไม่ได้ถูกใช้งานและจะถูกกำจัดออกไปทางท่อไอเสียและน้ำหล่อเย็น ซึ่งเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์เบนซินพลังงานที่ถูกทิ้งไปจะอยู่ระหว่าง 80 - 85% ส่วนเครื่องยนต์ดีเซลจะอยู่ที่ 75%

พลังงานร้อนที่ถูกทิ้งจากเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะถูกป้อนให้กับถังเมทัลไฮไดรด์เพื่อใช้ในการแตกตัวของไฮโดรเจนจากเมทัลไฮไดรด์ เพื่อให้เครื่องยนต์ทำงานตามที่ต้องการ เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะถูกจายเข้าเครื่องยนต์อย่างต่อเนื่องในปริมาณที่ต้องการและจะต้องให้พลังงานความร้อนกับถังเมทัลไฮไดรด์อย่างต่อเนื่องที่ระดับอุณหภูมิที่กำหนดมิฉะนั้นการจ่ายไฮโดรเจนจะหยุดลง สำหรับเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำสามารถใช้พลังงานความร้อนจากไอเสียหรือน้ำหล่อเย็นได้ทั้ง 2 แหล่ง แต่เมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูงจะใช้พลังงานความร้อนจากไอเสียได้เพียงอย่างเดียว ดังนั้นในการสร้างหรือทำถังเก็บเมทัลไฮไดรด์จึงสามารถมีรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 4.4 แสดงถังเมทัลไฮไดรด์ (ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนแบบภายนอกสำหรับ น้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนในรูปอาจเปลี่ยนเป็นแก๊สร้อนจากท่อไอเสีย หรือ ไอเสียก็ได้)

เมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำ

- ป้อนความร้อนโดยอาศัยระบบน้ำหล่อเย็น แบบมีน้ำเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน
- ป้อนความร้อนโดยอาศัยไอเสียแบบใช้แก๊สร้อนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน
- ป้อนความร้อนโดยอาศัยไอเสียแต่ใช้น้ำมันเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน โดยรับความร้อนจากไอเสีย และถ่ายให้กับถังเมทัลไฮไดรด์

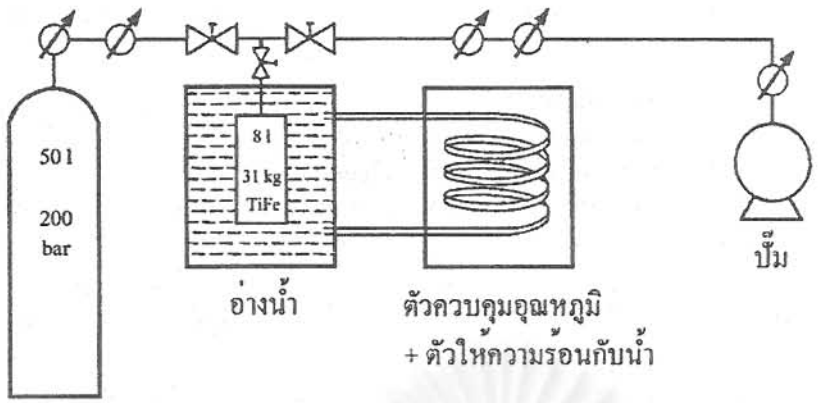
เมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานสูง

- ใช้พลังงานความร้อนที่ป้อนมาจากไอเสียโดยตรงโดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- ใช้พลังงานความร้อนที่ป้อนผ่านไอเสียเครื่องยนต์โดยใช้น้ำมันเป็นตัวกลางในแลกเปลี่ยนความร้อน

สำหรับการเลือกใช้รูปแบบในการป้อนพลังงานความร้อนให้กับถังเมทัลไฮไดรด์ สิ่งสำคัญที่ใช้พิจารณา คือ ขนาดปริมาตรถังที่สามารถใส่ในรถยนต์ เงื่อนไขด้านความปลอดภัย ค่าใช้จ่ายในการผลิต และน้ำหนักของตัวถัง

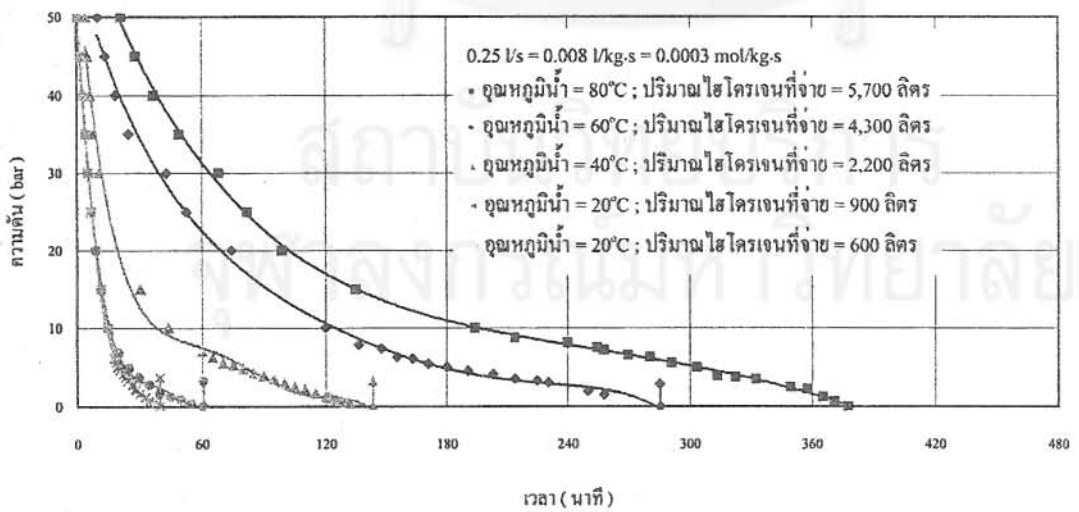
4.3.1 ถังเก็บแบบเมทัลไฮไดรด์ของ Daimler-Benz

ในปีค.ศ. 1973 Daimler-Benz ได้เป็นผู้ผลิตรถยนต์รายแรกของโลกที่ได้ทำการทดลองใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนซึ่งเก็บในถังเก็บเมทัลไฮไดรด์กับรถตู้ จนถึงปีค.ศ. 1981 การใช้รถทดสอบกับถังเมทัลไฮไดรด์ มีวัตถุประสงค์หลักคือการศึกษาการทำงานร่วมกันของเครื่องยนต์สันดาปภายในกับถังเมทัลไฮไดรด์ ในการทดลองนี้ เครื่องยนต์ที่ใช้ไม่มีการพัฒนาขึ้นมาใหม่ แต่ใช้เครื่องยนต์เบนซิน 4 สูบ ขนาด 2.3 ลิตร ที่มีการดัดแปลงเพียงเล็กน้อย ส่วนการผสมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนกับอากาศใช้การผสมแบบภายนอกกระบอกสูบ และยังมีการพ่นละอองน้ำ เพื่อช่วยลดปัญหาไฟย้อนกลับ (Flash back) และการจุดระเบิดเอง (Autoignition) สำหรับชนิดของโลหะผสมที่ใช้จะเป็น TiFe ซึ่งเป็นเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุหณภูมิใช้งานต่ำจึงต้องการพลังงานความร้อนสำหรับการจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของถังในปริมาณที่ต่ำ เครื่องยนต์ที่ได้ดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ไฮโดรเจนจะมีกำลัง P = 50 kW ที่ความเร็วรอบ n = 4800 rpm และกำลังอัด ε =9 ปัจจุบัน Daimler-Benz ได้ทำการศึกษาและทดลองกับถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ที่ใช้โลหะผสมอื่น ๆ อีกเช่น TiZr Cr Mn-,Mg_2Ni- และ Mg/Mg_2Ni-Hgdride

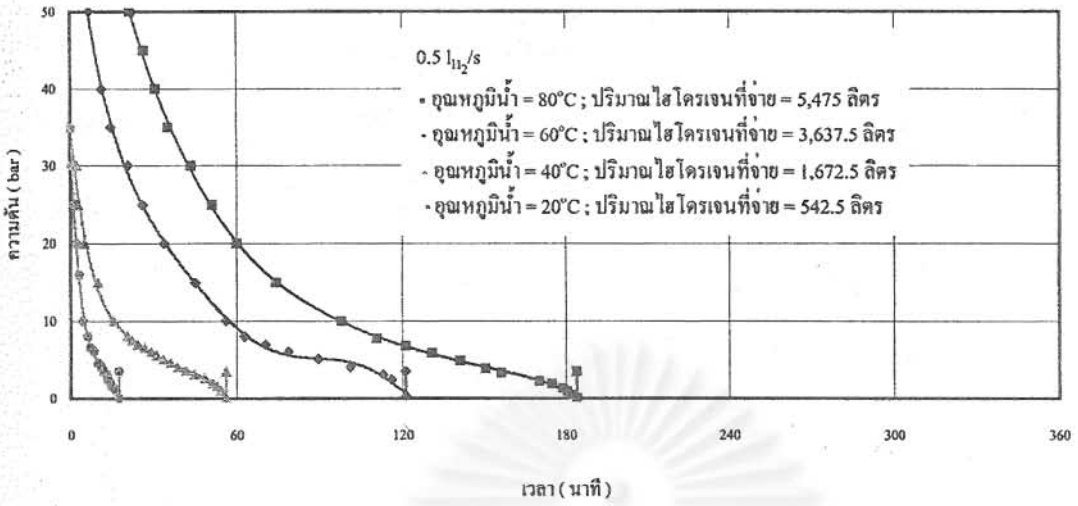


รูปที่ 4.5 ผังแสดงชุดทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับถังเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน

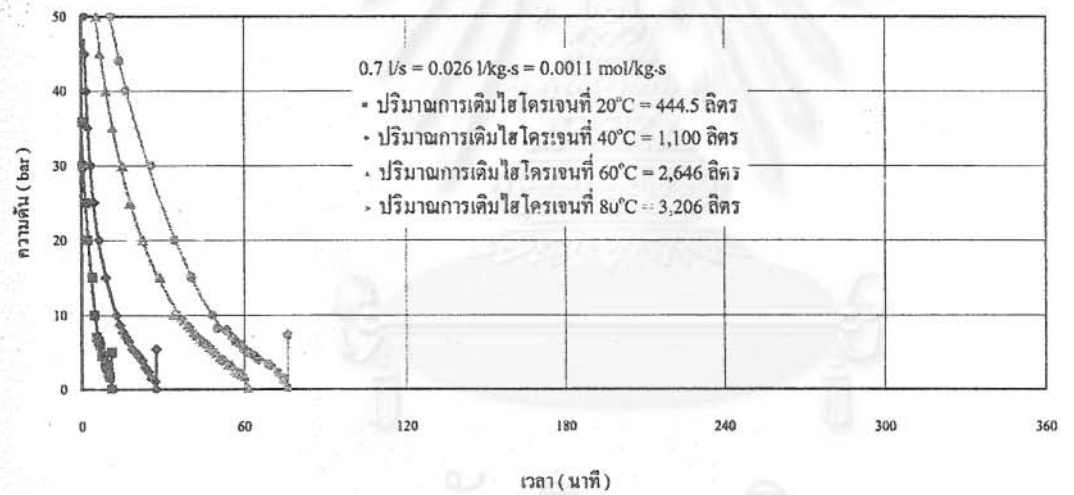
ค่าที่สำคัญที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของถังเก็บเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับอุปกรณ์ขับเคลื่อนรถยนต์ ก็คือ ความสามารถในการรับภาระจากเครื่องยนต์ขณะขับเคลื่อนในความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความดันของถังเก็บ ซึ่ง สามารถทำการทดลองได้ในห้องทดลอง โดยใช้ปั๊มสุญญากาศแทนเครื่องยนต์สันดาปภายใน ซึ่งจะจำลองสภาวะของเครื่องยนต์ขณะเดินเครื่องเต็มกำลังและขณะเดินเครื่องที่ภาระบางส่วน และมีการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อาศัยน้ำเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนแทนพลังงานความร้อนจากน้ำหล่อเย็นเครื่องยนต์ หรือจากไอเสียในรถยนต์ที่ใช้ไล่ไฮโดรเจนออกจากถังเมทัลไฮไดรด์ ความดันและอุณหภูมิของถังเมทัลไฮไดรด์จะถูกบันทึกในความสัมพันธ์กับเวลาและภาระ (load) ที่กำหนดในรูปที่ 4.6-4.9 เป็นกราฟแสดงภาระการทำงานของโลหะผสม หรือเมทัลไฮไดรด์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำสามารถใช้งานกับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้อย่างไม่มีปัญหา



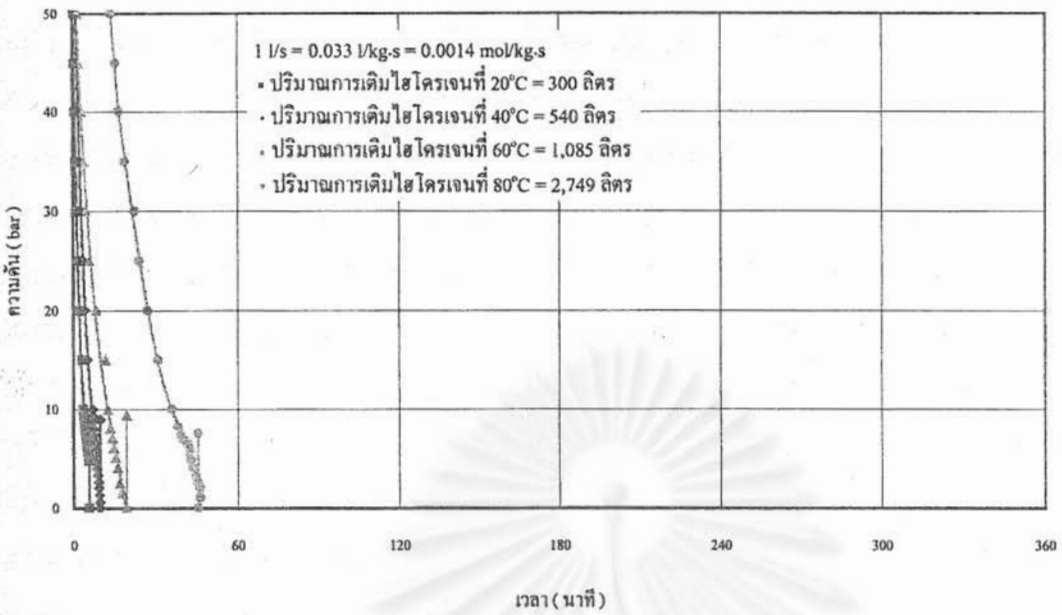
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงสมรรถนะของถัง TiFe-Hydride ในห้องปฏิบัติการ จ่ายไฮโดรเจนด้วยอัตรา 0.25 ลิตรต่อวินาที (ขณะเดินเบา เครื่องยนต์ 50 kW และ 200 – 300 kg เมทัลไฮไดรด์)



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงสมรรถนะของถัง TiFe-Hydride ในห้องปฏิบัติการจ่ายไฮโดรเจนด้วยอัตรา 0.5 ลิตรต่อวินาที

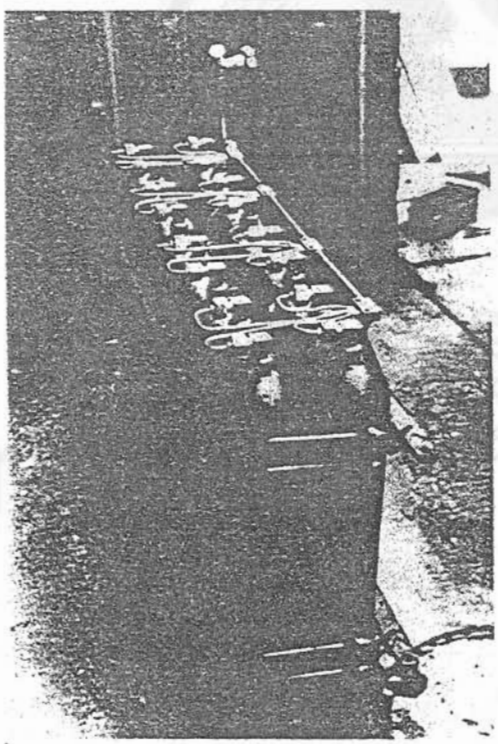


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงสมรรถนะของถัง TiFe-Hydride ในห้องปฏิบัติการจ่ายไฮโดรเจนด้วยอัตรา 0.7 ลิตรต่อวินาที



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงสมรรถนะของถัง TiFe-Hydride ในห้องปฏิบัติการจ่ายไฮโดรเจนด้วยอัตรา 1 ลิตรต่อวินาที

4.3.1.1 ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์แบบมีการถ่ายเทความร้อนภายนอกถังเก็บ



รูปที่ 4.10 ถังเมทัลไฮไดรด์ถังแรกของ Daimler-Benz

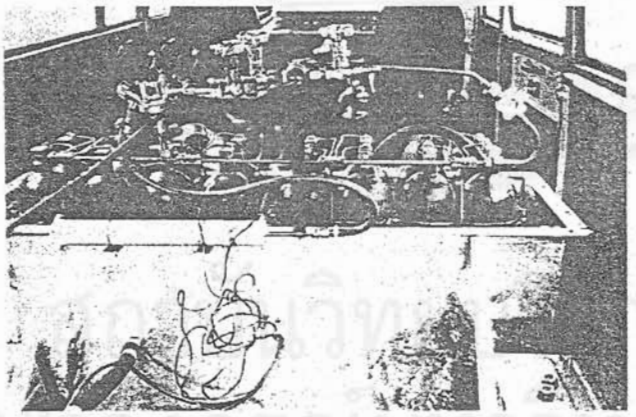
ถังทดสอบในรถยนต์ถังแรกของ Daimler-Benz ประกอบด้วยท่อเหล็กขนาด 8 ลิตร ต่อขนานกัน 16 ท่อ โดยมีปริมาตรรวม 128 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ถังใช้โลหะผสมTiFe ซึ่งผลิตโดยบริษัท Heraeus/Hanau โดยจะมีขนาดของเม็ดโลหะผสมเล็กกว่า 200 ไมครอน บรรจุในถังเก็บซึ่งมีท่อ 16 ท่อ รวมโลหะผสมหนัก 493 kg และมีความหนาแน่นในการบรรจุ 3.85 kg/dm^3 ซึ่งคิดเป็นความสามารถในการบรรจุประมาณ 70% เมื่อเทียบกับความหนาแน่นของ TiFe คือ 5.6 kg/dm^3 ถังเก็บถูกหล่อด้วยน้ำ 180 ลิตร ได้รับความร้อนโดยตรงจากน้ำหล่อเย็นจากเครื่องยนต์ ถังเก็บหลังจากผ่านการทำ Activation แล้วสามารถเก็บไฮโดรเจนได้ 90 m^3 เมื่อตัดปริมาตรที่ไม่สามารถใช้งานได้จะได้ความจุของถังอยู่ที่ 1.8% โดยน้ำหนัก สำหรับการทำให้เป็นเมทัลไฮไดรด์โดยสมบูรณ์ (การบรรจุไฮโดรเจนโดยสมบูรณ์) จะต้องใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจะถูกถ่ายเทออกสู่สิ่งแวดล้อมอย่างช้า ๆ โดยผ่านน้ำและผนังภาชนะ ดังที่เห็นในรูปที่ 4.11 เพื่อกำหนดสมรรถนะการทำงานของถังเก็บเมื่อมีภาวะในการใช้งานที่เปลี่ยนแปลง จำเป็นต้องกำหนดลักษณะของการขับทดสอบ ดังต่อไปนี้

20 วินาทีแรก ใช้เร่งความเร็วจากความเร็ว 0 km/h ถึง 50 km/h

30 วินาทีต่อมา ขับที่ความเร็วคงที่ 50 km/h

20 วินาทีต่อมา ปล่อยให้รถไหลไปแล้วจึงเบรกจนหยุดนิ่ง

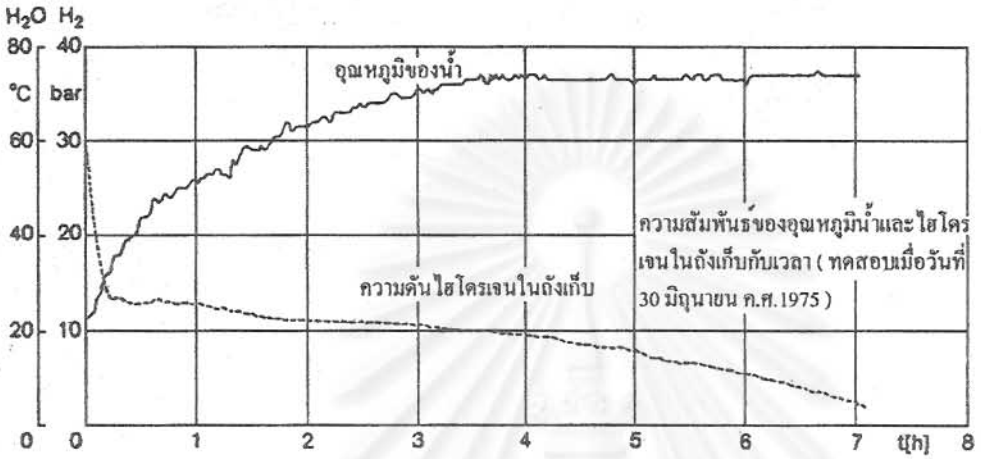
30 วินาทีเดินเบา



รูปที่ 4.11 ถังเมทัลไฮไดรด์ในอ่างน้ำ ซึ่งติดตั้งอยู่ในรถ

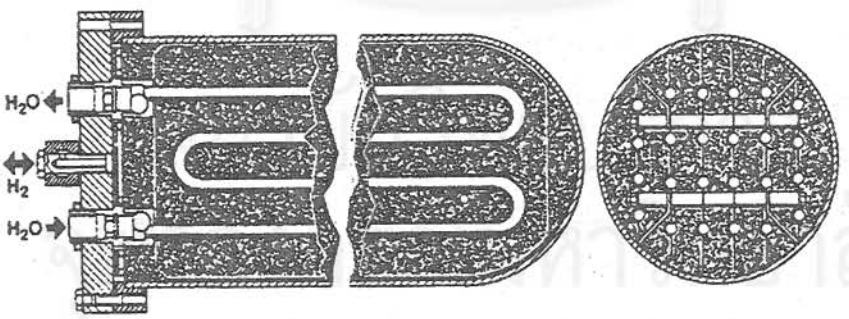
ลักษณะการขับดังกล่าวคิดเป็นรอบการทดสอบ 1 รอบ และจากการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจน 1 ครั้ง จะวิ่งได้ 242 รอบ รวมแล้วเป็นระยะทาง 187 km และใช้เวลารวม 7.5 ชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.12 โดยรถยนต์ที่ใช้ทดสอบเป็นรถเปล่าไม่ได้บรรทุกสิ่งใด มีน้ำหนักรวม 2 ตัน และถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ที่ใช้เป็นแบบง่าย ๆ มีความจุของพลังงานต่ำอยู่ที่ 330 W.h/kg ซึ่งคิดเทียบน้ำหนักเป็น 30 เท่าของถังเบนซิน เนื่องจากน้ำหนักของน้ำกับน้ำหนักของถังรวมกันแล้วมีน้ำหนักใกล้

เดียงกับน้ำหนักเมทัลไฮไดรด์ซึ่งทำให้น้ำหนักของถังเก็บอยู่ที่ 900 kg นอกจากนั้นยังใช้เวลาในการบรรจุไฮโดรเจนนานมาก (ใช้เวลาในการบรรจุให้เต็มอย่างน้อย 10 ชั่วโมงขึ้นไป) เมื่อเปรียบเทียบกับรถที่ใช้ไฟฟ้าซึ่งมีแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักหนึ่งตัน มาขับในสภาวะเดียวกันกับรถยนต์ที่ใช้ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ รถที่ใช้ไฟฟ้าจะวิ่งได้ระยะเพียง 40 km แสดงว่าถังเมทัลไฮไดรด์แบบง่าย ๆ ก็มีความสามารถในการบรรจุพลังงานดีกว่ารถที่ใช้ไฟฟ้าที่มีแบตเตอรี่เป็นแหล่งเก็บพลังงาน



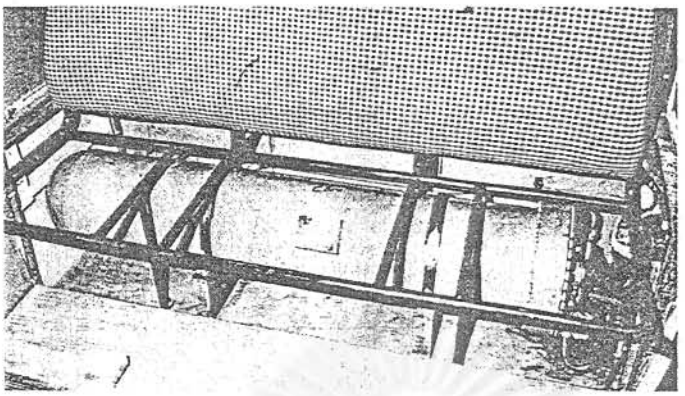
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการทำงานของถังเมทัลไฮไดรด์ในรถยนต์

เนื่องจากการทดลองในครั้งนี้ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ แม้การทดสอบครั้งนี้ระบบถ่ายเทความร้อนเป็นระบบถ่ายเทความร้อนภายนอกซึ่งเป็นระบบอย่างง่าย ทางบริษัท Daimler-Benz จึงได้ทำการพัฒนาถังรุ่นใหม่ที่มีระบบหล่อเย็นภายใน ซึ่งมีขนาดเล็กลงแต่มีความสามารถในการบรรจุใกล้เคียงถังชนิดเดิม คือ รถยนต์สามารถวิ่งได้เป็นระยะทางประมาณ 100 km ซึ่งใกล้เคียงของเดิม



รูปที่ 4.13ก ผังแสดงถังเมทัลไฮไดรด์ แบบมีระบบถ่ายเทความร้อนภายใน

4.3.1.2 ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์แบบมีการถ่ายเทความร้อนภายในถังเก็บ

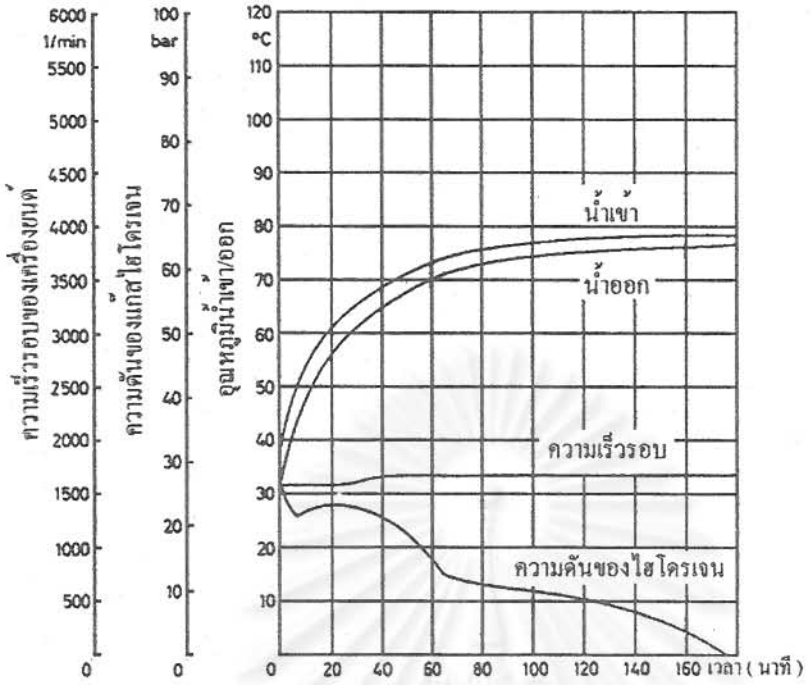


รูปที่ 4.13ข ภาพแสดงการติดตั้งถังเมทัลไฮไดรด์ แบบมีระบบถ่ายเทความร้อนภายในติดตั้งในรถยนต์ (ใต้เบาะ)

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ (200 kg TiFe-Alloy)

วัสดุ :	$TiFeH_2$
พลังงานจำเพาะของถัง :	ประมาณ 600 W.h/kg
น้ำหนัก :	ประมาณ 200 kg
ปริมาตร (โดยรวม) :	73 l
น้ำหนักของถังเก็บ :	ประมาณ 130 kg
พลังงานจำเพาะของระบบถังเก็บโดยรวม :	370 W.h/kg
ความดันภายในของถังเมทัลไฮไดรด์ :	ไม่เกิน 50 bar
ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดเมทัลไฮไดรด์ :	ไม่เกิน 10 ชั่วโมง

ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ชนิด TiFe ซึ่งใช้ระบบหล่อเย็นหรือใช้ระบบถ่ายเทความร้อนแบบภายใน (ข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.13ข) ถูกติดตั้งในรถยนต์ใต้เบาะคนขับเยื้องไปทางด้านหลัง โดยน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นน้ำในระบบหล่อเย็นของเครื่องยนต์ ในปีค.ศ. 1975 ได้มีการทดสอบภาคสนาม ในการทดสอบต่อเนื่องจะได้ระยะทางขับที่ 100 km (ความเร็วเฉลี่ย 50 km/h และความเร็วสูงสุด 105km/h) และรถยนต์ที่ใช้ถังเมทัลไฮไดรด์จะให้ผลการทดสอบโดยรวมดีกว่ารถยนต์ที่ใช้ไฟฟ้าที่มีอยู่ในขณะนั้นมาก ทุกครั้งในการทดลองจะมีการบันทึกค่า ความดันภายถังเมทัลไฮไดรด์ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่เข้าและออกจากถัง ซึ่งตัวอย่างผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลการวัดจากการขับทดสอบ สำหรับถังเก็บจากรูป 3.13ก และ ข

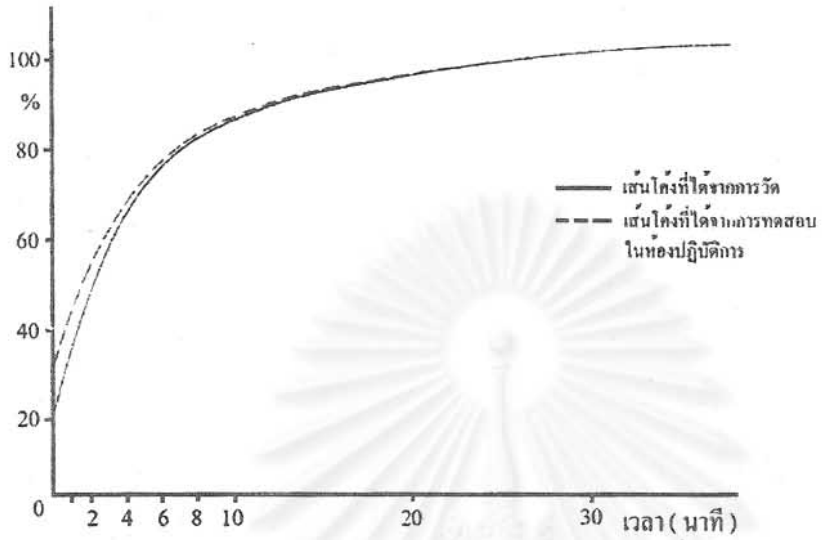
จากการทดลอง จะเห็นว่าอุณหภูมิของถังเก็บจะลดลงตามลักษณะการขับจนกระทั่งเครื่องยนต์และน้ำหล่อเย็นร้อนขึ้น ทำให้โลหะผสมมีอุณหภูมิสูงขึ้น อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่เข้าและออกจากถัง จะลดลงประมาณ 12°C ลดจากอุณหภูมิ 20°C (เป็นอุณหภูมิของน้ำที่คาดว่าเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกขณะ
นั้น) เหลือ 8°C และอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์จะสูงขึ้นเป็น 60°C หลังจากเวลาผ่านไป 30 นาที และเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง อุณหภูมิจะสูงขึ้นถึง 70°C และอุณหภูมิสุดท้ายจะเป็น 80°C อุณหภูมิน้ำเข้าและออกจะมีผลต่างอุณหภูมิ 10°C ค่าสูงสุดอยู่ที่ 12°C ซึ่งเกิดขณะที่อุณหภูมิต่ำตอนเริ่มเดินเครื่อง

สำหรับกราฟความดันของไฮโดรเจนในถังเก็บจะมีตำแหน่งที่มีความดันประมาณคงที่อยู่ 2 ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งตำแหน่งที่มีความดันคงที่ตำแหน่งที่ 2 ความดันจะอยู่ที่ 10 bar และเป็นตำแหน่งที่มีช่วงทำงานค่อนข้างกว้าง และมีความชันของเส้นกราฟเพียงเล็กน้อย โดยลักษณะของกราฟนั้นมิได้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้เชื่อเพลิงของรถยนต์ เพียงอย่างเดียวแต่จะขึ้นและแผนภาพ PCI ของโลหะผสมนั้น ๆ ซึ่งในการขับทดสอบครั้งนี้จะได้ข้อสรุปสำคัญอยู่ 2 ข้อ คือ

1. ความดันของแก๊สไฮโดรเจน ในถังเก็บจะสูงกว่า 5 bar ตลอด 90% ของระยะเวลาที่ใช้งาน
2. อุณหภูมิสุดท้ายของถังเมทัลไฮไดรด์จะประมาณ 80°C ทุก ๆ ลักษณะการขับ

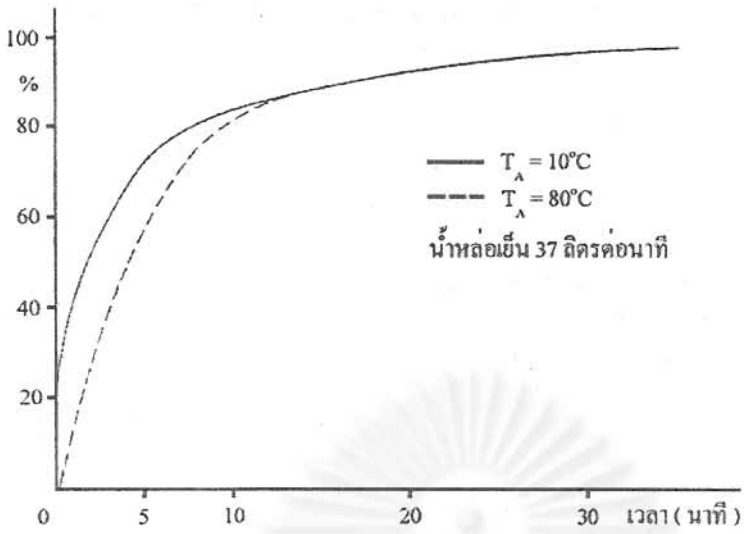
ห้องสมุดสถาบันวิจัยพลังงาน
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 เทคนิคการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนในถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำ



รูปที่ 4.15 เวลาที่ใช้ในการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเข้าถังเปล่าที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำ ความดันไฮโดรเจน 50 bar น้ำหล่อเย็นไหลด้วยอัตรา 37 ลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

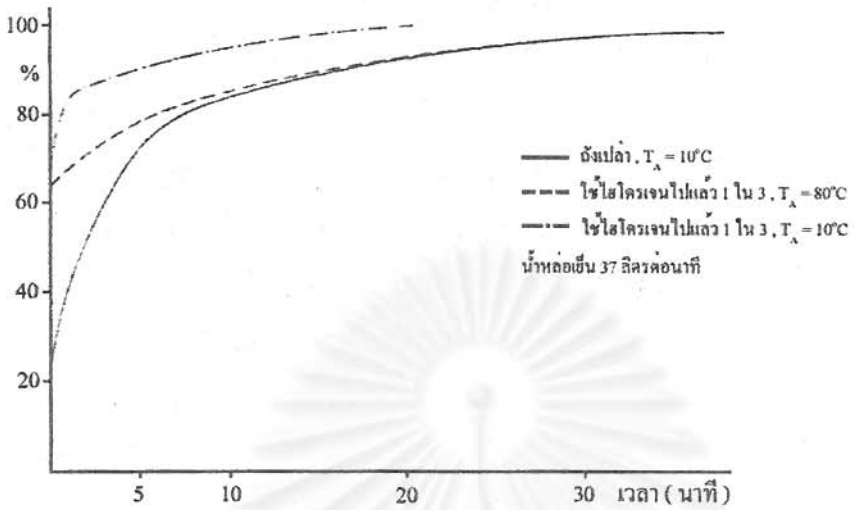


รูปที่ 4.16 เวลาที่ใช้ในการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเข้าถังเปล่าที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นสูง

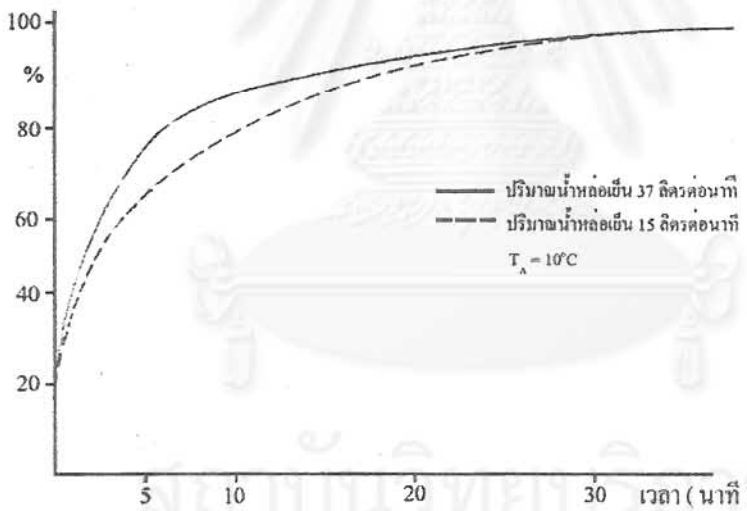
ในรูปที่ 4.15 เป็นแผนภาพแสดงลักษณะประจำตัวของการบรรจุแก๊สไฮโดรเจนของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิใช้งานต่ำ พบว่าขณะเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบใช้เวลาในการเติมสั้นจากถังที่ใช้เชื้อเพลิงจนหมดพบว่าการเติมไฮโดรเจนจนได้ปริมาณ 80% ของถังในขณะที่ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์มีอุณหภูมิต่ำจะใช้เวลาเพียง 8 นาทีเท่านั้น (เส้นเต็มในกราฟ) ส่วนในรูปที่ 4.16 แสดงกราฟการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนสำหรับถังที่ใช้เชื้อเพลิงจนหมด และเป็นถังที่อยู่ในสภาพที่ยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ (เส้นประในกราฟ) ซึ่งเป็นการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนทันทีหลังจากการใช้งานในรถยนต์ เนื่องจากอุณหภูมิของถังเก็บในขณะนั้นจะมีค่าอยู่ที่ 80°C ดังนั้นการดูดซับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบทันทีทันใดของถังเก็บเช่นเดียวกับขณะที่ถังเย็นจึงเป็นไปไม่ได้ เนื่องจากไม่สามารถใช้ความสามารถในการจุดความร้อนของมวลของถังและโลหะผสมให้เป็นประโยชน์ได้เนื่องจากมีอุณหภูมิสูงอยู่ ดังนั้นความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาจะต้องถ่ายเทจากระบบโดยระบบน้ำหล่อเย็นเพียงทางเดียว รูปที่ 4.16 เป็นการเติมไฮโดรเจนขณะถังร้อน ปริมาตรไฮโดรเจนที่เก็บจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 0% โดยความเร็วในการรับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของถังและปริมาณความร้อนที่คายออกในช่วงนาทีแรก ๆ จะใกล้เคียงกับของถังที่มีอุณหภูมิต่ำ และเมื่อเวลาในการเติมเพิ่มขึ้น เส้นกราฟทั้ง 2 เส้นจะเข้าใกล้กัน สำหรับความจุที่ 80% ของถัง การบรรจุไฮโดรเจนขณะที่ถังมีอุณหภูมิสูงจะใช้เวลาประมาณ 10 นาที

สำหรับการทดสอบความเป็นไปได้ของการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจน ขณะที่ถังยังมีเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเหลืออยู่ (ใช้ไปบางส่วน) โดยมีปริมาณเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเหลืออยู่ในถังประมาณ 62% สำหรับถังเก็บขณะที่มีอุณหภูมิต่ำและมีอุณหภูมิสูง ในรูปที่ 4.17 จะแสดงกราฟของการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของถังที่ถูกใช้เชื้อเพลิงจนหมด เพื่อเป็นการเปรียบเทียบ สำหรับถังบรรจุเชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นสูง การรับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะเป็นเช่นเดียวกับการเติมในถังเปล่าที่มีความจุเดียวกัน

และการรับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนอย่างรวดเร็วจะเกิดขึ้นกับถังที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำ (เส้นกราฟ -.-)



รูปที่ 4.17 เวลาที่ใช้ในการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของถังเมทัลไฮไดรด์ที่มีการใช้เชื้อเพลิงบางส่วน โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 10 และ 80°C



รูปที่ 4.18 เวลาที่ใช้ในการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของถังเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิต่ำ โดยมีปริมาณน้ำหล่อเย็นเป็นตัวแปร

ดังนั้นในทางปฏิบัติสำหรับการนำรถไฮโดรเจนไปใช้จริงจะมีข้อแนะนำสำหรับการเติมเชื้อเพลิงคือ ก่อนเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนควรปิดระบบถ่ายเทความร้อนที่ให้กับถังเมทัลไฮไดรด์ เพื่อให้อุณหภูมิของถังลดลงก่อนการเติม โดยการเติมเราจะใช้ความจุความร้อนของถังช่วยรับความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่เกิดขณะทำการบรรจุไฮโดรเจน ในรูปที่ 4.18 แสดงการเติมเชื้อเพลิงแบบรวดเร็วในความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในระบบ จากกราฟ พบว่าการลดปริมาณน้ำในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจาก 37 ลิตรต่อนาที เป็น 15 ลิตรต่อนาที จะเพิ่มเวลาการบรรจุไฮโดรเจนสำหรับ

80% ของถังจากประมาณ 8 นาที เป็น 12 นาที ซึ่งก็ยังเป็นตัวเลขที่ใช้กับรถยนต์ได้อย่างไม่มีปัญหา

สำหรับรถเก๋งที่ใช้โลหะผสมชนิด TiZrCrMn จะมีเอนทาลปีของปฏิกิริยา ΔH =25kJ/mol ซึ่งเป็นตัวเลขที่น้อย และในการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของรถยนต์ 280 kg เมทัลไฮไดรด์ หรือ 5.4 kgH2 คิดเป็น 2,700 molH2 ที่ 25 kJ/molH2 ก็จะได้พลังงาน 67.5 MJ

สำหรับประมาณความร้อนดังกล่าวจะต้องถูกถ่ายเทออกภายในเวลาไม่เกิน 10 นาที หรืออาจกล่าวง่าย ๆ คือต้องใช้กำลังในการทำความเย็นสูงถึง 150 kW ดังนั้นจึงไม่เป็นการประหยัดถ้าจะใช้พลังงานจากไฟฟ้าในการทำความเย็น หรือช่วยในการขจัดปริมาณความร้อนนี้ออกไปจากระบบภายในเวลา 10 นาที ในการแก้ปัญหานี้ สำหรับการทดสอบในเมืองเบอร์ลินจะใช้แท็งก์น้ำขนาด 20,000 ลิตรเพื่อทำความเย็นดังกล่าว และความร้อนที่น้ำจำนวนนี้รับไว้จะถูกกระจายไปสู่สภาพแวดล้อมที่พื้นที่ค่อนข้างใหญ่ สำหรับการเติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนอย่างรวดเร็วควรให้ก๊าซไฮโดรเจนกระจายและครอบคลุมโลหะผสมอย่างทั่วถึง เพื่อให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยากระจายสม่ำเสมอเช่นกัน ดังนั้นจึงใช้ท่อเดินก๊าซไฮโดรเจนที่ทำมาจากตาข่ายถี่และม้วนซ้อนกันอยู่ ท่อนี้จะฝังอยู่กลางท่อบรรจุโลหะผสมนอกจากทำหน้าที่ส่งและรับก๊าซไฮโดรเจนแล้วยังทำหน้าที่กรองมิให้อนุภาคของเมทัลไฮโดรด์ติดออกมากพร้อมกับก๊าซไฮโดรเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
ถังเมทัลไฮไดรด์ KW5

จากการศึกษาข้อมูลทุติยภูมิพบว่าการจัดเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนทำได้หลายวิธีแต่วิธีที่น่าสนใจและสามารถนำมาใช้กับรถยนต์ได้ดีจะเป็นการจัดเก็บในรูปของเมทัลไฮไดรด์ (บทที่ 1) และจากการศึกษาพบว่าเมทัลไฮไดรด์ชนิดอุณหภูมิต่ำจะมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับรถไฮโดรเจนของโครงการ เนื่องจากที่อุณหภูมิห้องความดันของก๊าซภายในถังเก็บสูงพอ ($\geq$ bar) และเอนทาลปีของปฏิกิริยา (ΔH) มีค่าต่ำ การติดตั้งระบบน้ำเพื่อใช้หล่อเย็นและถ่ายเทความร้อนให้กับถังเก็บจึงทำได้ไม่ยากนัก ด้านความปลอดภัยพบว่าตัวผงโลหะผสมที่มีขนาดเล็กมาก และสามารถทำปฏิกิริยากับอ๊อกซิเจนในอากาศ และเกิดการลุกไหม้ขึ้นอย่างรุนแรงได้และสามารถก่อให้เกิดอันตรายที่ร้ายแรงต่อผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงได้ และเหตุผลที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้ทีมวิจัยนี้ตัดสินใจสั่งซื้อถังเมทัลไอไดร์ด KW5 เนื่องจากหลังการบรรจุโลหะผสมลงในถังแล้ว ก่อนใช้งานต้องทำโลหะผสมในถังให้อยู่ในสภาพที่ Active Active ก่อนขั้นตอนนี้ต้องการอุปกรณ์ เช่นตู่อบความร้อนขนาดใหญ่ และเนื่องจากอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากถังรั่วหรือชำรุดของถัง ถังที่ผลิตนี้จำเป็นต้องผ่านการทดสอบและรับรองตามมาตรฐานที่กำหนด การทำถังขึ้นเองจึงไม่เป็น การประหยัดและปลอดภัยทีมมาวิจัยจึงได้ตัดสินใจสั่งทำถังเมทัลไฮรด์ KW5 ที่มีความจุใกล้เคียงกับท่อบรรจุไฮโดรเจนแบบความดันสูงที่ใช้อยู่เดิม ถังเมทัลไฮไดรด์ KW5 ถูกผลิตขึ้นตามมาตรฐานของประเทศเยอรมัน ซึ่งเป็นที่ยอมรับมีความปลอดภัย

5.1 ข้อมูลจำเพาะทางเทคนิค

ถังเมทัลไฮไดรด์ KW 5 ประกอบด้วย ท่อ 3 ท่อที่เชื่อมต่อถึงกัน และติดตั้งอยู่ภายในถังหุ้มซึ่งประกอบด้วยช่องทางไหลของสารแลกเปลี่ยนความร้อนในที่นี้ใช้น้ำมันเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งทั้งตัวท่อความดันและช่องทางไหลของสารแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นวัสดุที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ชนิดของ alloys ที่เลือกขึ้นกับช่วยอุณหภูมิและความดันที่ใช้งาน และ alloy ที่ใช้จะเป็น Class C ในตาราง 5.1

Alloy class	A	C	D	E
Type	AB	AB_2	A_2B	AB_2
Alloy components	A. Ti	A : Ti, Zr	A:Mg	A:MM, La, Ce
	B: Fe, Mn	B:V, Fe, Cr, Mn, Ni	B:Ni	B:Ni (Mn, Al, Fe, Co

ตาราง 5.1 Alloy types for GfE Hydralloy® hydrogen storage alloys.

ข้อมูลทางเทคนิค

- Type : KW 5
- H_2 capacity : Approx. 5 Nm^3 H_2
- Metalhydride alloy : Hydralloy C5
- Metalhydride mass : 30 kg
- Tank volume : 3 × 3.1 l = 9.3 l
- Operating pressure : Approx. 6 bars (20°C)
- Designed pressure : 50 bar (100°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

5.2 การติดตั้งถังเมทัลไฮไดรด์ KW5

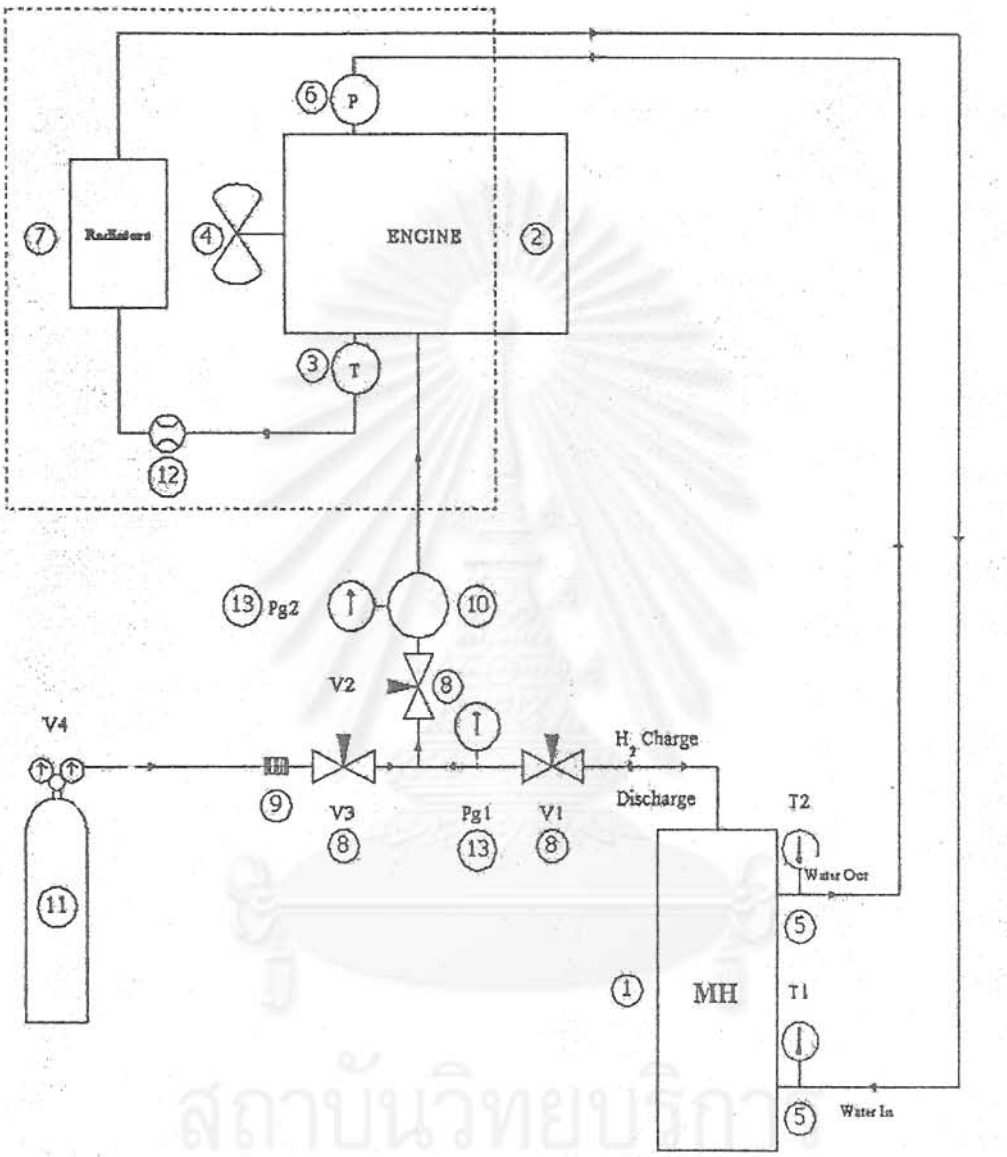
งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัย ต่อเนื่อง ในโครงการก่อนหน้านี้ได้ทำการดัดแปลงเครื่องยนต์สันดาปภายในให้สามารถใช้กับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนได้ และเรียกเครื่องยนต์ที่ดันแปลงนี้ว่า เครื่องยนต์ไฮโดรเจน โดยได้ทำการติดตั้งในรถกะบะ Mazda Familiar ถังบรรจุเชื้อเพลิงในขณะนั้นเป็นถังแบบความดันสูง 2 ถัง แต่ละถังมีความจุที่ 5 m^3 ในแง่ของความปลอดภัยถังแบบความดันสูงจะมีความปลอดภัยน้อย ดังนั้นในโครงการนี้ได้ทำการพัฒนารถไฮโดรเจนต่ออีกขั้นหนึ่ง โดยทำการศึกษาการจัดเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนในรูปของเมทัลไฮไดรด์และได้ติดตั้งถังเมทัลไฮไดรด์ KW5 กับรถไฮโดรเจน เพื่อทดสอบสมรรถนะขณะทำงานร่วมกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ถังเมทัลไฮไดรด์

KW5นี้จะมีความจุประมาณ 5 m^3 เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงขนาดของถังเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนทั้ง 2 แบบที่มีขนาดความจุของเชื้อเพลิงใกล้เคียงกัน โดยถังความดันสูงจะมีความจุสูงกว่าถังเมทัลไฮไดรด์ KW5 เล็กน้อย ดูรูปที่ ก1 ในภาคผนวก ก.

5.2.1 การออกแบบระบบเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของถังเมทัลไฮไดรด์ KW5

การวางระบบท่อเชื้อเพลิงจากถังเมทัลไฮไดรด์ KW5 จะต้องพิจารณาถึงขั้นตอนการบรรจุเชื้อเพลิง การจ่ายเชื้อเพลิงจากถังไปยังระบบท่อเชื้อเพลิงเดิมของรถและตรวจสอบการรั่วซึมของเชื้อเพลิง ขณะบรรจุอากาศที่เข้าสู่ระบบจะต้องถูกกำจัดทิ้งผ่านท่อเชื้อเพลิงเดิมไปยังเครื่องยนต์ และไม่สามารถย้อนกลับเข้าสู่ถังเมทัลไฮไดรด์ ได้ เพราะอากาศจะทำให้โลหะผสมในถังเมทัลไฮไดรด์ เสื่อมสภาพ ระบบเชื้อเพลิงของถังเมทัลไฮไดรด์ KW5 แสดงไว้ในรูปที่ 5.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



1. Metal Hydride Storage Tank
2. Engine
3. Thermostat
4. Fan
5. Temperature Measurement
6. Pump
7. Radiator
8. Needle Vavle
9. Quick Connector
10. Regulator
11. Hydrogen High Pressure Tank
12. Water flow meter
13. Pressure Gauge

รูปที่ 5.1 ผังแสดงการติดตั้งถังเมทัลไฮไดรด์บนรถ

อุปกรณ์ที่เพิ่มเติมและจำเป็นมีดังนี้

1. ลิ้นควบคุมการจ่ายก๊าซไฮโดรเจน (Needle Valve) ลิ้นควบคุมการจ่ายก๊าซไฮโดรเจนจะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ปิดเปิด และควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน ในรูปจะเป็นวาล์วหมายเลข 8
2. ข้อต่อ 3 ทาง (Tree Way)
   ข้อต่อ 3 ทางจะเชื่อมโยง ถังเมทัลไฮไดรด์ KW5 ถังความดันสูงและระบบท่อเดิมเข้าด้วยกัน
3. เกจวัดความดันก๊าซ (Pressure gauge)
   เกจวัดแรงดันของก๊าซในรูปจะเป็น หมายเลข 13 ทำหน้าที่วัดแรงดันของก๊าซภายในถังโดยเปิดวาล์วเบอร์ V1 และปิดวาล์วเบอร์ V2 และ V3
4. ลิ้นควบคุมแรงดันก๊าซไฮโดรเจน (Pressure Regulator)
   ลิ้นควบคุมแรงดันหมายเลข 10 ในรูปที่ 5.1 ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันของก๊าซไฮโดรเจนที่จายออกให้มีแรงดันอยู่ที่ 5 bar (ระบบก๊าซของไฮโดรเจนต้องการแรงดัน 5 bar)
5. ข้อต่อ (Quick Commector)
   ข้อต่อหมายเลข 9 ในรูป ทำหน้าที่ต่อท่อก๊าซจากถังความดันสูงเข้าสู่ระบบท่อเชื้อเพลิงเมื่อต้องการบรรจุเชื้อเพลิงลงในถังเมทัลไฮไดรด์ KW5 หรือเมื่องต้องการใช้ก๊าซไฮโดรเจนจากถังความดันสูงโดยตรง เพื่อขับเคลื่อนรถยนต์

สำหรับการออกแบบระบบเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของถังเมทัลไฮไดรด์ KW5 จะต้องวิเคราะห์ขั้นตอนของการเติมเชื้อเพลิง ขั้นตอนการทำงานของถังขณะจ่ายเชื้อเพลิงไปยังระบบเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของรถ การตรวจการรั่วซึม การวัดความดันในถังเมทัลไฮไดรด์ และในระบบเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้เงื่อนไขสำหรับการออกแบบระบบท่อเชื้อเพลิง และผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นข้อกำหนดที่สำคัญดังนี้

1. ในขั้นตอนของการบรรจุเชื้อเพลิงจะต้องมีจุดต่อสำหรับถังเติมที่เป็นถังแบบความดันสูง การต่อต้องรวดเร็วและทำได้บ่อยครับ โดยรอยต่อต้องไม่ชำรุดในที่นี้จะใช้ Quick Conmector จุดต่อหมายเลข 9 ในรูป 5.1
2. ขณะต่อท่อก๊าซเพื่อบรรจุเชื้อเพลิงจะมีอากาศเข้าสู่ระบบท่อ ดังนั้นจะต้องกันอากาศมิให้เข้าถังเมทัลไฮไดรด์ และต้องขจัดออกจากระบบท่อได้ ในที่นี้จะใช้เครื่องยนต์เป็นตัวดูดออก และวาล์วหมายเลข V1 จะกันมิให้อากาศเข้าถังเมทัลไฮไดรด์
3. ความดันภายในถังเมทัลไฮไดรด์ KW5 และในระบบท่อของถังต้องสามารถวัดได้ ในที่นี้จะมี Pressure Gauge หมายเลข P_g1 ในรูป 1 และวาล์วหมายเลข V2 เพื่อปิดทางเดินก๊าซต้องการทราบความดันหรือตรวจสอบการรั่วซึม
4. การต่อเข้าสู่ระบบเชื้อเพลิงเดิมของรถและต่อเข้ากับถังความดันสูงจะต้องใช้ข้อต่อ 3 ทาง ดูรูป

ในรูป 5.1 เป็นระบบเชื้อเพลิงที่ได้ออกแบบและติดตั้งกับรถไฮโดรเจน จากการทดลองใช้งานพบว่าสามารถทำงานได้ดีและมีความปลอดภัย

5.2.2 การออกแบบระบบน้ำหล่อเย็นของถังเมทัลไฮไดรด์ KW5

การบรรจุและการจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของถังเมทัลไฮไดรด์ เป็นปฏิกิริยา Exothermic ขณะบรรจุเชื้อเพลิงไฮโดรเจนปฏิกิริยาที่เกิดจะให้ความร้อน และขณะจ่ายเชื้อเพลิงจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน การถ่ายเทความร้อนจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในถังเมทัลไฮไดรด์ KW5 จะใช้น้ำเป็นตัวกลาง ดังนั้นจึงต้องออกแบบระบบน้ำหล่อเย็นเพื่อให้ถังเมทัลไฮไดรด์ KW5 ทำงานได้

พิจารณาที่ตัวเครื่องยนต์ เครื่องยนต์จะมีระบบน้ำหล่อเย็นของเครื่องปั๊มน้ำจะดูดน้ำจากหม้อน้ำและปั๊มผ่านเครื่องยนต์เพื่อทำการหล่อเย็นเครื่อง และจะออกจากเครื่องยนต์เข้าสู่หม้อน้ำด้านบนพัดลม จะเป็นตัวดูดอากาศผ่านหม้อน้ำเพื่อระบายความร้อนออก ขณะเครื่องยนต์ทำงานอุณหภูมิของน้ำขณะออกจากเครื่องยนต์และเข้าสู่หม้อน้ำจะอยู่ที่ประมาณ 70°C และจะออกจากหม้อน้ำโดยมีอุณหภูมิประมาณ 60°C เมื่อพิจารณาผังแสดงโครงสร้างภายในของถังเมทัลไฮไดรด์ KW5 (รูปที่ ข1) จะเห็นช่องทางเดินของน้ำหล่อเย็นที่อยู่โดยรอบท่อบรรจุเชื้อเพลิงทั้ง 3 (ช่องว่างใน Coolant Jacket) ทางเดินของน้ำหล่อเย็นนี้จะมีขนาดกว้างเมื่อเทียบกับทางเดินน้ำในเครื่องยนต์และหม้อน้ำ ดังนั้นความต้านทานน้ำขณะไหลผ่านจึงน้อย ด้วยเหตุผลนี้จึงต่อระบบน้ำของถังเมทัลไฮไดรด์ โดยต่ออนุกรมเข้ากับระบบน้ำของเครื่องยนต์ และไม่ใช้ปั๊มช่วยการพิจารณาตำแหน่งของถังเมทัลไฮไดรด์ในระบบน้ำหล่อเย็น จากข้อมูลทางเทคนิคของถังเมทัลไฮไดรด์ระบุความดันน้ำไม่เกิน 0.6 bar ดังนั้นจึงต่อทางออกของน้ำหล่อเย็นของถังเข้ากับทางดูดปั๊ม และท่อทางเข้าจะต่อกับทางออกของน้ำจากหม้อน้ำปั๊มน้ำจะดูดน้ำจากถังเมทัลไฮไดรด์ และปั๊มเข้าเครื่องยนต์ จากการทดลองวิ่งพบว่าปั๊มน้ำสามารถทำงานได้ อุณหภูมิขาเข้าของของถังเมทัลไฮไดรด์จึงอยู่ที่ 70°C ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านระบบจะเป็นไปตามการทำงานของปั๊มน้ำของเครื่องยนต์และไม่มีการควบคุมปริมาณของน้ำที่ไหลผ่านถัง ปริมาณความร้อนที่ปฏิกิริยาต้องการขณะจ่ายเชื้อเพลิงจะดูดจากระบบน้ำหล่อเย็นตามปริมาณของไฮโดรเจนจ่ายออกความดันของก๊าซไฮโดรเจนในถังจะขึ้นกับอุณหภูมิของถังและน้ำหล่อเย็นประมาณ 70°C รูปที่ 5.1 แสดงผังการเดินท่อน้ำเย็น จากข้อมูลทางทฤษฎีพบว่าค่าความร้อนของปฏิกิริยาสำหรับถังเมทัลไฮไดรด์ ชนิดอุณหภูมิต่ำจะมีค่าไม่เกิน 15% ของค่าความร้อนต่ำสุดของไฮโดรเจน เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จะพบว่าความร้อนที่ศูนย์เสียให้กับน้ำหล่อเย็นและไอเสียมีค่าสูงถึงประมาณ 68% ของค่าความร้อนต่ำสุด ดังนั้นความร้อนในระบบน้ำหล่อเครื่องยนต์จะมีปริมาณสูงเพียงพอสำหรับน้ำหล่อเย็นที่ใช้ขณะบรรจุเชื้อเพลิงไฮโดรเจน เพื่อให้สะดวกและง่ายและสามารถใช้งานได้ดีแต่จะสิ้นเปลืองน้ำบ้าง เราจะระบายความร้อนจากปฏิกิริยาขณะบรรจุเชื้อเพลิงไฮโดรเจนโดยใช้น้ำประปาที่อุณหภูมิห้อง โดยให้น้ำไหลผ่านถังและทิ้งลงสู่ท่อระบายน้ำ ระบบน้ำหล่อเย็นโดยรวมแสดงไว้ในรูปที่ ข.2

5..2.3 ขั้นตอนการใช้งานของระบบเชื้อเพลิงและระบบน้ำหล่อเย็น

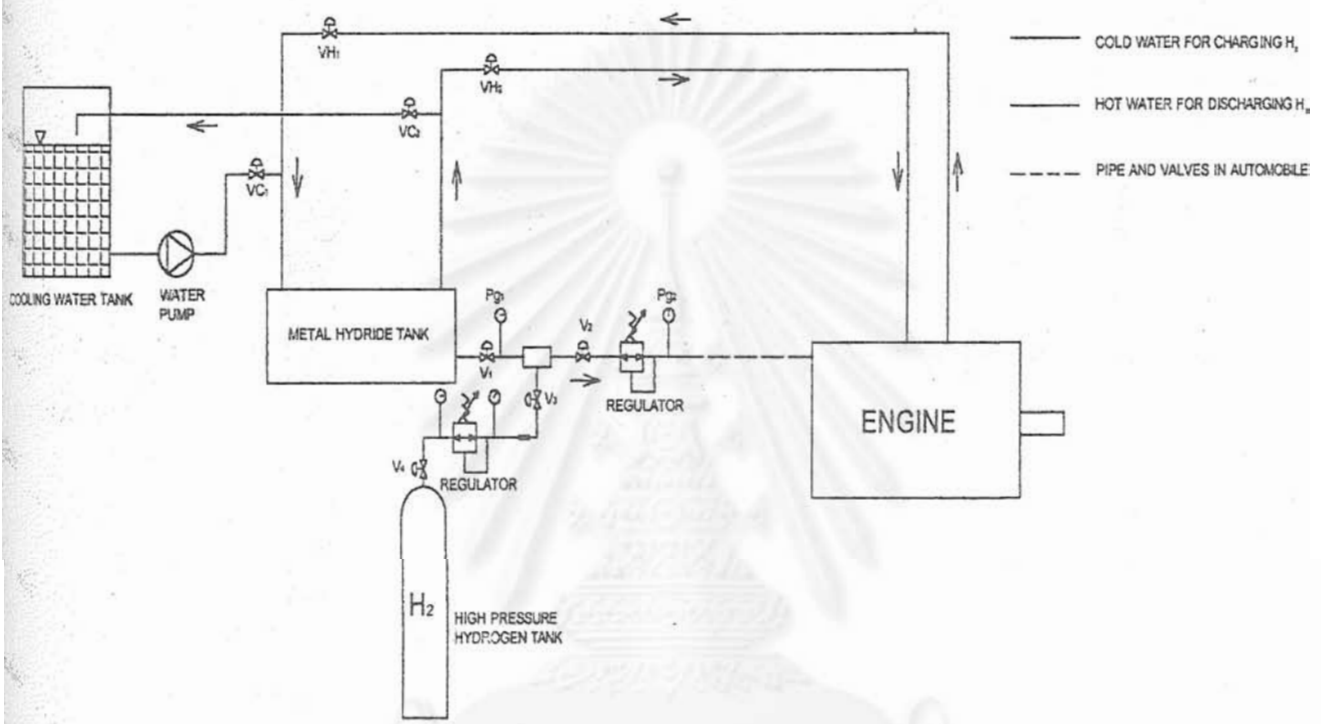
เพื่อมิให้เกิดอันตรายต่อบุคคลและถังเมทัลไฮโดรด์ การใช้งานขณะทำการบรรจุและจ่ายเชื้อเพลิงจะต้องเป็นไปอย่างถูกต้อง ให้ขั้นตอนของการออกแบบระบบเชื้อเพลิงและท่อน้ำหล่อเย็นจะต้องคำนึงถึงจุดนี้ด้วยเพื่อให้เกิดความปลอดภัยขณะปฏิบัติงาน และได้ของขั้นตอนของการปฏิบัติงานได้ดังนี้

ขั้นตอนของการบรรจุเชื้อเพลิงจากถังความดันสูง (รูปที่ ข.2)

1. เมื่อสังเกตว่าความดันที่อ่านได้ P_{g1} ต่ำกว่า 6 bar แสดงว่าต้องเติมไฮโดรเจน
2. ต่อระบบเชื้อเพลิงของถังเมทัลไฮไดรด์เข้ากับถังเก็บไฮโดรจเนแบบความดันสูง ดังแสดงในรูปที่ ข.2
3. ปิดวาล์ว VH_1 และวาล์ว VH_2
4. เดินเครื่องและรอจนถังเมทัลไฮไดรด์มีอุณหภูมิลงพอประมาณ
5. เปิดวาล์ว V_4 ปรับค่าความดันที่ตัวคุมค่า (Regulator) ให้ได้ 20 bar
6. ค่อยๆ เปิด V_3 ควบคุมไม่ให้ความดันที่ Pg_1 สูงไปจากค่าเดิม
7. เดินเครื่องต่ออีกประมาณ 30 วินาที ถึง 1 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีอากาศค้างอยู่ในท่อ
8. ปิดวาล์ว V_2 แล้วดับเครื่อง
9. เปิดวาล์ว V_1 และเปิดวาล์ว V_3 ให้ Pg_1 อ่านค่าได้ 20 bar เพื่อทำการบรรจุไฮโดรเจนลงในถังเมทัลไฮไดรด์
10. เมื่อถังเมทัลไฮไดรด์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ให้เปิดวาล์ว VC_1 , VC_2 และปั๊ม ในระบบน้ำหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อน

ขั้นตอนการใช้เชื้อเพลิงจากถังเมทัลไฮไดรด์

1. ปิดวาล์ว VC_1 , VC_2 ในระบบน้ำหล่อเย็น
2. เปิดวาล์ว VH_1 , VH_2
3. ขณะใช้งาน ถังเก็บไฮโดรเจนแบบความดันสูง , ตัวควบคุมที่หัวถัง และวาล์ว V_3 จะถูกตัดออกจากระบบ
4. เปิดวาล์ว V_1 ความดันไฮโดรเจนในถังเมทัลไฮไดรด์ที่ Pg_1 ต้องไม่ต่ำกว่า 5 bar
5. เปิดวาล์ว V_2 ความดันที่ Pg_2 ต้องอ่านได้ 5 bar (ห้ามสูงเกินกว่า 5 bar)
6. เปิดวาล์วที่ระบบท่อเชื้อเพลิงไฮโดรเจนของรถยนต์ และทำการเดินเครื่องได้



HYDROGEN FUEL AND COOLING WATER SYSTEMS DIAGRAM

รูปที่ ข.2 ผังแสดงระบบท่อน้ำหล่อเย็นและระบบท่อเชื้อเพลิงไฮโดรเจน

บทที่ 6
การทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบเมทัลไฮไดรด์

ภายหลังจากติดตั้งระบบเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบเมทัลไฮโดรเจนกับระบบเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ รวมทั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่าง ๆ ปรับแต่เครื่องยนต์ไฮโดรเจนให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบถังเมทัลไฮไดรด์

สำหรับเครื่องยนต์ไฮโดรเจนขณะใช้เชื้อเพลิงจากถังเก็บความดันสูง มีอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำในระบบหล่อเย็นในเครื่องยนต์ (ดังรูปที่ ข.3) ประกอบด้วย

1. Water flow meter
2. Osciloscope
3. Thermometer for measurement ambient temperature
4. Thermocouple type K for measurement cooling water temperature
5. Clock

สำหรับเครื่องยนต์ไฮโดรเจนขณะใช้เชื้อเพลิงจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ มีอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบหสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ สำหรับการเก็บและปล่อยก๊าซไฮโดรเจน (ดังรูปที่ ข.4) ประกอบด้วย

1. Pressure gauge
2. Thermometer for measurement ambient temperature
3. Thermocouple type K for measurement cooling water temperature
4. Water flow meter
5. Osciloscope
6. Clock

การทดสอบกับระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์

วิธีทดสอบ

การทดสอบเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่ออกจากเครื่องยนต์ โดยวัดอุณหภูมิขาเข้า-ออกจากหม้อน้ำ ที่รอบเครื่องยนต์ 1,200 รอบต่อนาที ขณะเครื่องยนต์เดินเบา วัดค่าดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิมาขาเข้าหม้อน้ำ
2. อุณหภูมิขาออกหม้อน้ำ
3. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์
4. อุณหภูมิบรรยากาศ
5. อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น
6. เวลาที่เครื่องยนต์ใช้ไฮโดรเจนจากถังเก็บความดันสูง

บันทึกค่าต่าง เพื่อหาค่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นในเครื่องยนต์ จากนั้นเปลี่ยนรอบเครื่องยนต์เป็น 1,700 รอบต่อนาที 2,000 รอบต่อนาทีและ 2,500 รอบต่อนาที บันทึกค่าต่าง ๆ ข้างต้นที่รอบต่างๆ ข้อมูลแสดงไว้ในตาราง ง1-ง4 และกราฟรูปที่ ค1-ค4

การทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮโดรด์ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจน

วิธีการทดสอบ

ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเท่ากับอัตราการไหลของน้ำในหม้อน้ำ ควบคุมอุณหภูมิขาเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ โดยเริ่มที่น้ำอุณหภูมิห้อง เครื่องเดินเบาที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1,200 รอบต่อนาที บันทึกค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิขาเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
2. อุณหภูมิขาออกถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
3. ความดันขาออกจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
4. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์
5. อุณหภูมิบรรยากาศ
6. อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น
7. อัตรรการไหลของไฮโดรเจน
8. เวลาที่เครื่องยนต์ใช้ไฮโดรเจนจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์

หลังจากบันทึกค่าต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ทำการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยเปลี่ยนความเร็วรอบของเครื่องยนต์เป็น 1,700 รอบต่อนาที 2,000 รอบต่อนาทีและ 2,500 รอบต่อนาที ตามลำดับ และบันทึกค่าเช่นเดียวกันกับข้างต้นที่รอบต่างๆ จากนั้นเปลี่ยนค่าอุณหภูมิขาเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์เพิ่มเป็นๆ 50 องศาเซลเซียส และ 70 องศาเซลเซียส และเดินเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ1,700 รอบต่อนาที 2,000 รอบต่อนาทีและ 2,500 รอบต่อนาที ทำการบันทึกค่าต่างๆ ข้อมูลแสดงไว้ในตาราง ง.5 ถึง ง.13 และกราฟรูปที่ ค.5-ค7 นอกจากนี้ในรูปที่ ค.8 ดังแสดงความดันของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ที่เพิ่มขึ้นหลังหยุดการปล่อยก๊าซไฮโดรเจน

การทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ขณะบรรจุก๊าซไฮโดรเจน

วิธีทดสอบ

ควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นให้เท่ากับอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิห้อง ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเท่ากับอัตราการไหลของน้ำในหม้อน้ำ วัดค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิขาเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
2. อุณหภูมิขาออกถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
3. ความดันที่ใช้ขณะบรรจุ
4. อุณหภูมิบรรยากาศ
5. อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น
6. เวลาที่ใช้

บันทึกค่าต่างๆ ดังกล่าว ทำการทดสอบโดยเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของน้ำเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์เพิ่มขึ้นเป็น 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และ 3.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ทำการบันทึกค่าต่างๆ เช่นเดียวกัน จากนั้นเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น เป็น 50 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกค่าต่างๆ ข้างต้น จากนั้นเปลี่ยนเป็นการบรรจุก๊าซขณะถังเก็บเมทัลไฮไดรด์มีอุณหภูมิสูง ทำการบันทึกค่าต่างๆ เช่นเดียวกัน ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์เมื่อบรรจุเต็มแล้ว ดูได้จากอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่เขาและออกจากถัง อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเข้าและออกถังจะเท่ากันเนื่องจากไฮโดรเจนที่เข้าถังไม่ทำปฏิกิริยาต่อ เนื่องจากโลหะผสมได้กลายเป็นเมทัลไฮไดรด์ทั้งหมด ข้อมูลแสดงไว้ในตาราง ง.14-ง.19 และกราฟรูปที่ ค.9-ค.11

การทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจน เมื่อถังได้รับความร้อนจากน้ำหล่อเย็นเครื่องยนต์

วิธีทดสอบ

ภายหลังจากการติดตั้งถังเก็บเมทัลไฮไดรด์เข้ากับเครื่องยนต์แล้ว ดังรูปที่ 5.1 ทดสอบโดยตั้งเครื่องเดินเบาที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1,200 รอบต่อนาที บันทึกค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิขาเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
2. อุณหภูมิขาออกถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
3. ความดันขาออกจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
4. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์
5. อุณหภูมิบรรยากาศ
6. อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น
7. อัตรรการไหลของไฮโดรเจน
8. เวลาที่เครื่องยนต์ใช้ไฮโดรเจนจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์

หลังจากบันทึกค่าต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ทำการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยเปลี่ยนความเร็วรอบของเครื่องยนต์เป็น 1,700 รอบต่อนาที 2,000 รอบต่อนาทีและ 2,500 รอบต่อนาที ตามลำดับ ข้อมูลแสดงไว้ในตาราง ง-20 ถึง ง-23 และกราฟรูปที่ ค.12 ถึง ค.15

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7
การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์

จากข้อมูลผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นในเครื่องยนต์แสดงไว้ในตาราง ง.1 ถึง ง.4 และกราฟรูปที่ ค.1 ถึง ค.4 จากข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นถึงอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์ ในสภาวะคงที่อัตราการไหลจะอยู่ที่ประมาณ 1.4 m^3/h ตัวเลขนี้จะใช้กับระบบน้ำหล่อเย็นของถังเมทัลไฮไดรด์ขณะทดสอบสมรรถนะของถัง อุณหภูมิขาเข้าหม้อน้ำจะอยู่ประมาณ 70°C และขาออกจะอยู่ที่ประมาณ 60°C เมื่อเครื่องยนต์เดินที่ภาระสูงขึ้น อุณหภูมินี้จะเพิ่มขึ้นตามแต่อุณหภูมิขาเข้าหม้อน้ำก็จะไม่สูงเกิน 80°C อุณหภูมิเมื่อผ่านหม้อน้ำจะลดลงประมาณ 10 °C อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเครื่องยนต์นี้จะใช้เพื่อทดสอบสมรรถนะของถังและวางระบบน้ำหล่อเย็นของถังเมทัลไฮไดรด์

จากข้อมูลผลการทดสอบสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ขณะจ่ายก๊าซไฮโดรเจน แสดงไว้ในตาราง ง-5 ถึง ง-8 และกราฟรูปที่ ค.5 สำหรับอัตราการไหลของน้ำผ่านถังเทมัลไฮไดรด์ที่ตั้งไว้เท่ากับอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเครื่องยนต์ คือ 1.4 m^3/h จากตาราง ง-5 ถึง ง-8 จะเห็นได้ว่าที่สภาวะคงที่อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นจะลดลงเพียง 1-2 °C แสดงว่าอัตราการไหลของน้ำ 1.4 m^3/h เพียงพอที่จะจ่ายความร้อนแก่ถัง และเมื่อดูอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ใช้ทดสอบแสดงให้เห็นว่าการติดเครื่องขณะที่เครื่องเย็นไม่มีปัญหาเพราะที่อุณหภูมิห้องถังสามารถจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนได้อย่างต่อเนื่อง จากกราฟรูปที่ ค.5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อรอบเครื่องสูงขึ้นอัตราจ่ายเชื้อเพลิงของถังจะสูงขึ้น และที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาทีจะเห็นได้ว่า หลังเวลา 12 นาที ถังจะจ่ายเชื้อเพลิงในอัตรา 0.5195 ลิตร/วินาทีไม่ทัน ข้อมูลในตาราง ง-9 ถึง ง-12 เป็นข้อมูลที่ได้ขณะน้ำหล่อเย็นถังมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 50 °C จะเห็นได้ว่าความสามารถในการจ่ายเชื้อเพลิงจะดีขึ้นกว่าเดิมและที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อนาทีสามารถจ่ายเชื้อเพลิงได้ในอัตรา 0.5195 ลิตร/วินาทีนานถึง 35 นาที ในตาราง ง-13 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นถังเป็น 70°C ที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิง 0.5195 ลิตรต่อวินาทีสามารถจ่ายเชื้อเพลิงได้นานถึง 35 นาที เช่นกัน ดูกราฟรูปที่ ค.7 ในรูป ค.8 แสดงความดันภายในถัง และเมื่อหยุดการจ่ายเชื้อเพลิงความดันในถังจะสูงขึ้นตาม ซึ่งจะเป็นไปตาม PCI ของโลหะผสม

จากผลการทดสอบอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเครื่องยนต์ และผลทดสอบการจ่ายเชื้อเพลิงของถังเมื่อใช้อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่เท่ากันพบว่าถังสามารถใช้งานได้ ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการออกแบบระบบท่อน้ำหล่อเย็น และระบบท่อเชื้อเพลิงของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ลงบนรถ ดูผังรูปที่ ข.2 จากนั้นได้ทำการทดสอบสมรรถนะอีกครั้งหนึ่ง ผลการทดสอบแสดงไว้ในตาราง ง-20 ถึง ง-23 จากผลการทดสอบระบบจ่ายเชื้อเพลิงของถังที่ติดตั้งไว้

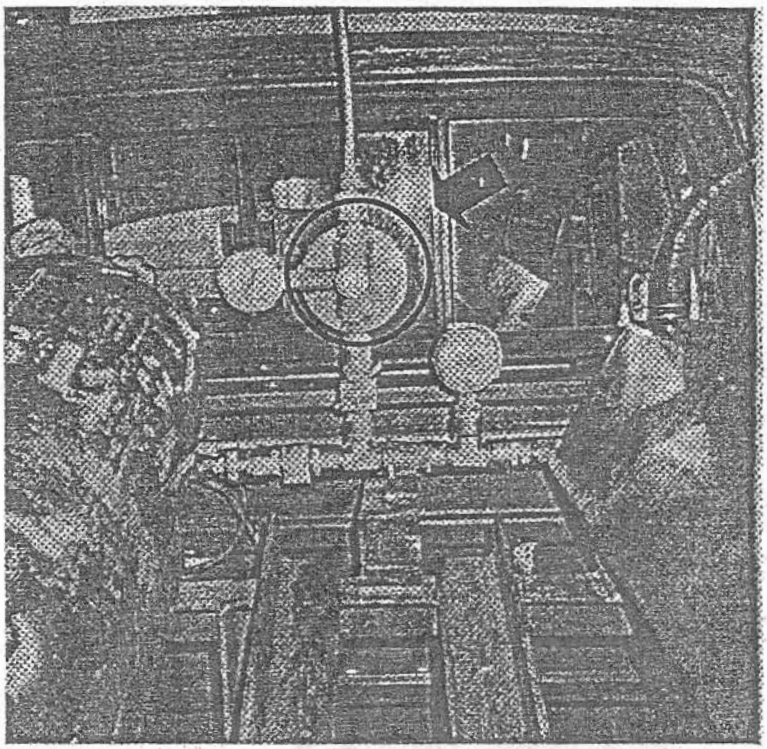
บนรถไฮโดรเจนสรุปได้ว่าท่อน้ำและถังเมทัลไฮไดรด์มิได้เพิ่มความต้านทานให้กับระบบน้ำหล่อเย็นของเครื่องมากนักและสามารถตัดทิ้งได้โดยดูที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นจะมีอัตราการไหลประมาณเท่าเดิมโดยเฉพาะเมื่อรอบเครื่องยนต์สูงพอ อุณหภูมิผ่านถังเก็บจะลดลงประมาณ 1°C เมื่ออุณหภูมิเข้าอยู่ที่ 59°C ที่อุณหภูมิขาเข้าต่ำกว่านี้ อุณหภูมิน้ำเมื่อผ่านถังจะลดลงประมาณ 2 °C เหตุผลก็เนื่องจากโลหะผสมที่อยู่ภายในถังเป็นโลหะผสมที่ไม่เป็นชนิดเดียวกันทั้งหมดจึงมีค่าเอนทาลปีของปฏิกิริยารวมทั้งอุณหภูมิและความดันทำงานไม่เท่ากันและ จากกราฟรูปที่ ค.12 ถึง ค.15 แสดงให้เห็นว่าการทำงานของถังเมทัลไฮไดรด์ขณะจ่ายเชื้อเพลิงเป็นไปด้วยดี ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าระบบน้ำหล่อเย็นและระบบเชื้อเพลิงที่วางไว้กับรถไฮโดรเจนสามารถใช้งานได้

เมื่อพิจารณาการบรรจุเชื้อเพลิง ข้อมูลแสดงไว้ในตาราง ง-14 ถึง ง-19 และกราฟรูป ค.9 ถึง ค.11 ความดันของก๊าซไฮโดรเจนขณะบรรจุจะเริ่มที่ 10 bar 20 bar ความดันสุดท้ายจะเป็น 30 bar เมื่อถังถูกบรรจุเต็มจะสังเกตได้จากอุณหภูมิน้ำที่ผ่านถัง อุณหภูมิจะไม่เปลี่ยนแปลง หมายถึงปฏิกิริยาหยุดแล้วหรือโลหะกลายเป็นเมทัลไฮไดรด์ทั้งหมดแล้วการบรรจุจะสิ้นสุดลง ในการทดสอบช่วงแรกจะดูผลของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการบรรจุ จากกราฟรูปที่ ค.9 จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อน้ำหล่อเย็นมีอัตราการไหลเพิ่ม เวลาที่ใช้บรรจุจะลดลง จากนั้นเป็นการทดสอบเพื่อดูอุณหภูมิเริ่มต้นของถังเก็บ จากกราฟรูปที่ ค.10 จะเห็นได้ว่า เมื่อถังเก็บมีอุณหภูมิก่อนการบรรจุต่ำการบรรจุจะใช้เวลาน้อยลง โดยเฉพาะในช่วงต้นของการบรรจุ (70%-80% แรกของถัง) สุดท้ายเป็นการทดสอบเพื่อดูผลของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น และพบว่าอุณหภูมิน้ำเย็นสูงการบรรจุจะใช้เวลามาก ดังนั้นการบรรจุจึงไม่สามารถใช้น้ำหล่อเย็นจากเครื่องยนต์ได้ (วงจรปิด) จะต้องใช้น้ำหล่อเย็นจากภายนอกและที่อุณหภูมิห้องเท่านั้น น้ำเมื่อไหลผ่านถังแล้วอาจทิ้งหรือเก็บไว้ในถังเก็บขนาดใหญ่และเมื่ออุณหภูมิลดลงเท่าอุณหภูมิห้องก็นำกลับมาใช้ได้อีก ผลจากการวิเคราะห์จะนำไปใช้กับการออกแบบระบบท่อเชื้อเพลิงและระบบน้ำหล่อเย็นของถังเก็บรวมทั้งขั้นตอนของการปฏิบัติงานขณะทำการบรรจุเชื้อเพลิง และการจ่ายเชื้อเพลิง เพื่อให้การปฏิบัติงานเป็นไปอย่างปลอดภัยและถูกต้องในทางเทคนิค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

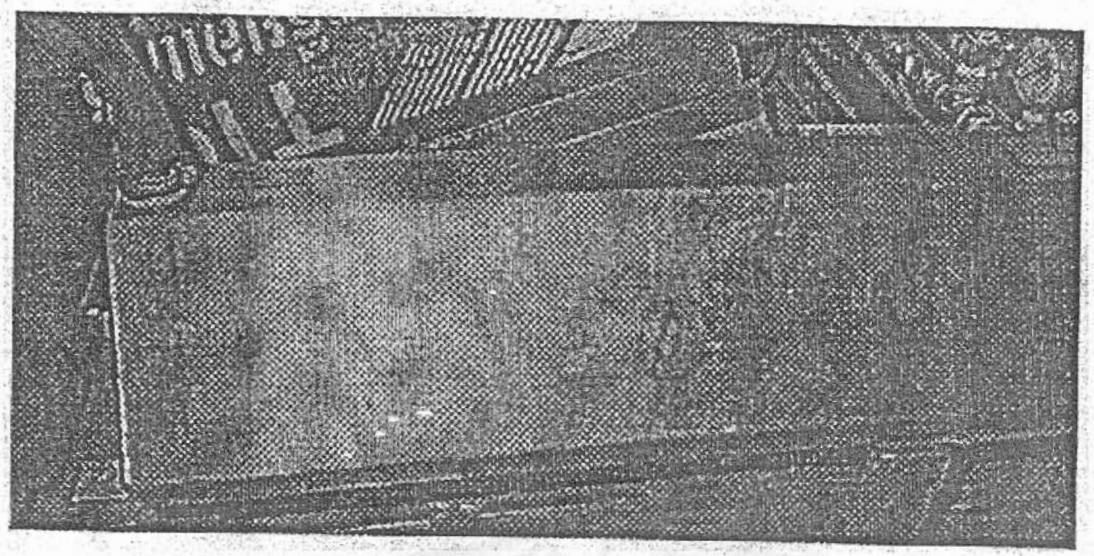
ภาคผนวก ก.

ภาพถ่าย

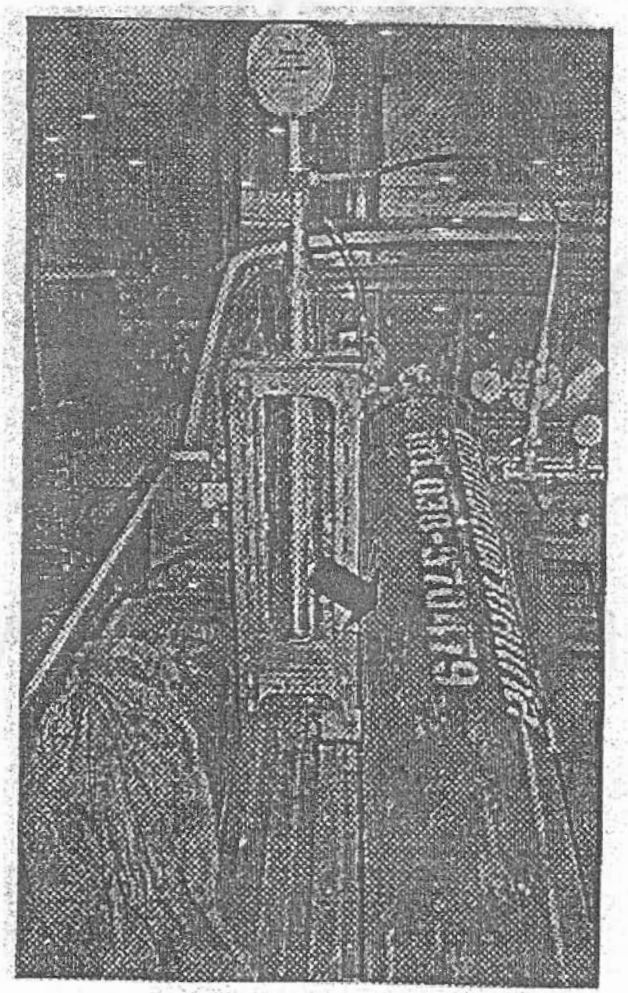


รูปที่ ก.1 แสดงลิ้นควบคุมแรงดันก๊าซไฮโดรเจน (Pressure regulator)
ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนจากถังเมทัลไฮไดรด์

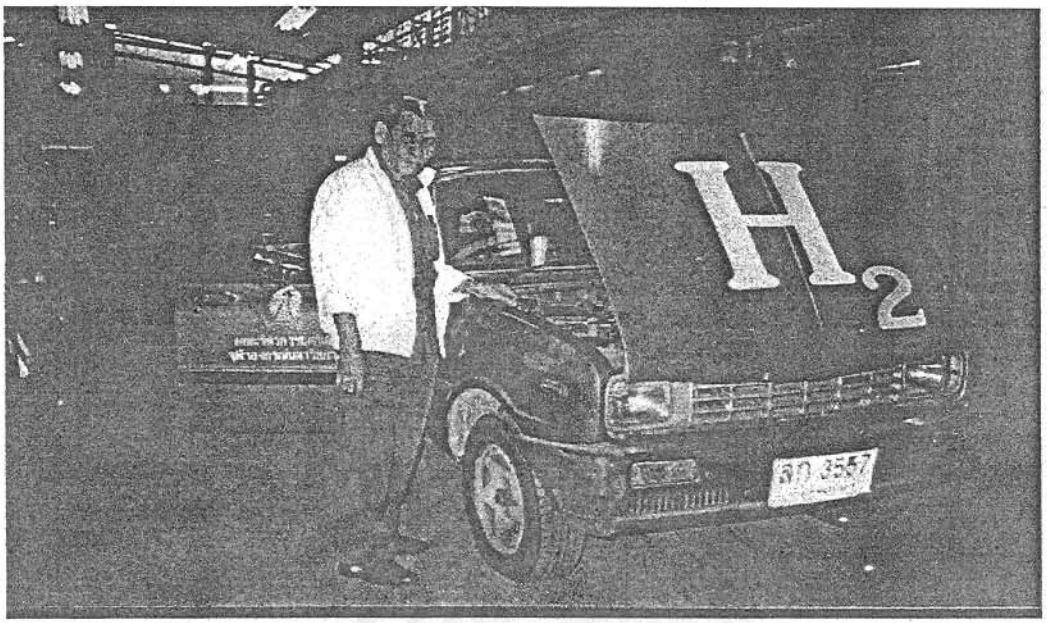
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.2 แสดงถังเมทัลไฮไดรด์ KW 5



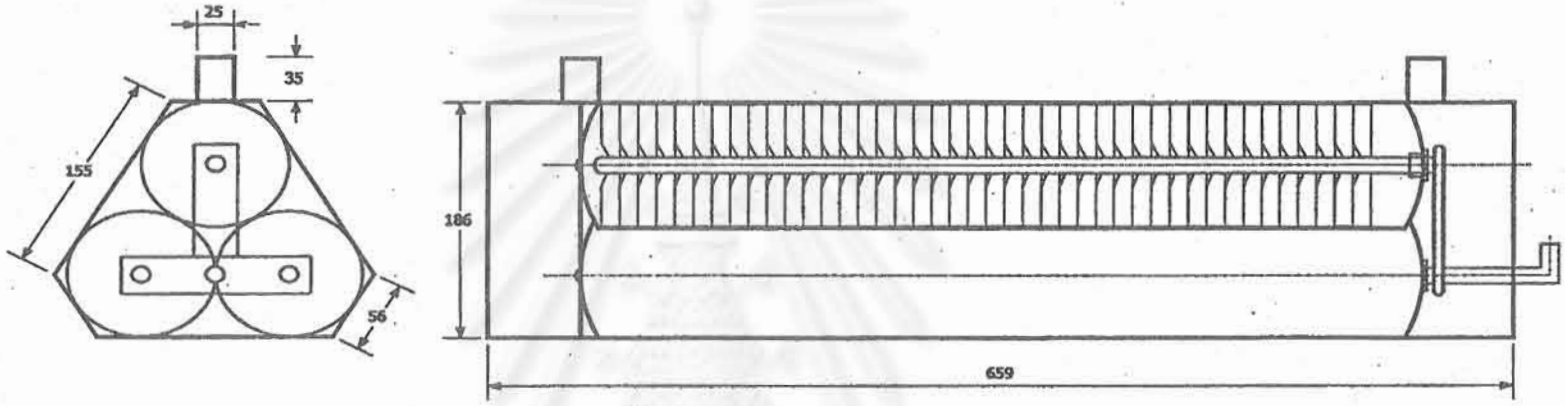
รูปที่ ก.3 แสดงถังความดันสูง



รูปที่ ก.4 รถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

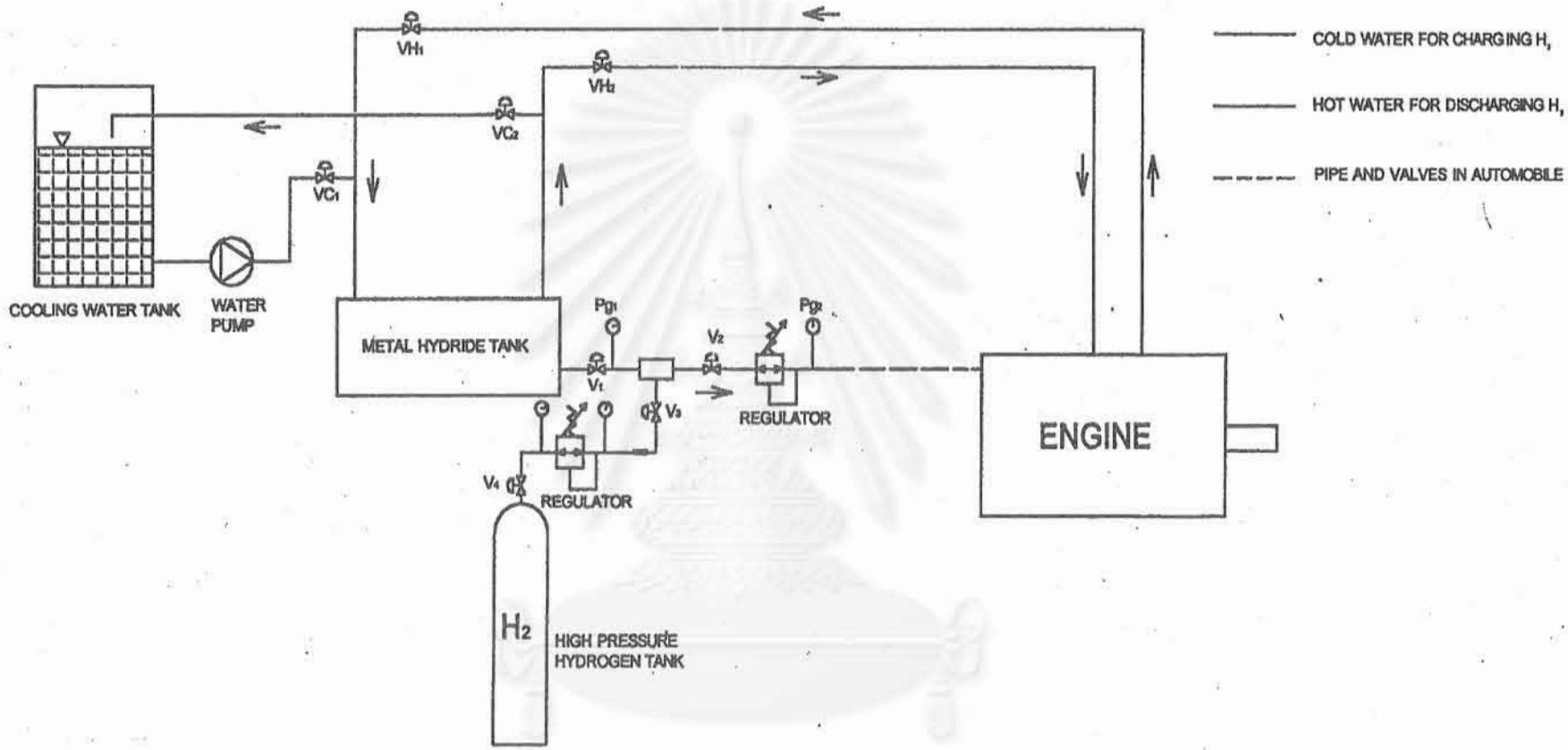
ภาคผนวก ข.
ผังแสดงอุปกรณ์



Metal Hydride Storage Container KW5	
Hydrogen Capacity	Approx. 5 Nm3 H2
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.

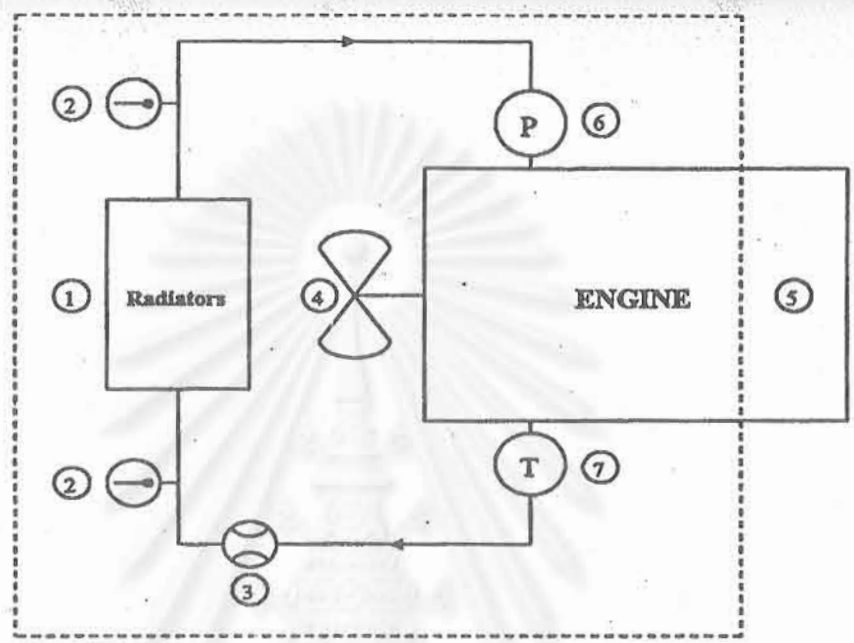
ข.1 Schematic Construction ของถังเมทัลไฮไดรด์ KW5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ข.2 ผังแสดงระบบน้ำหล่อเย็น และระบบท่อเชื้อเพลิงไฮโดรเจน

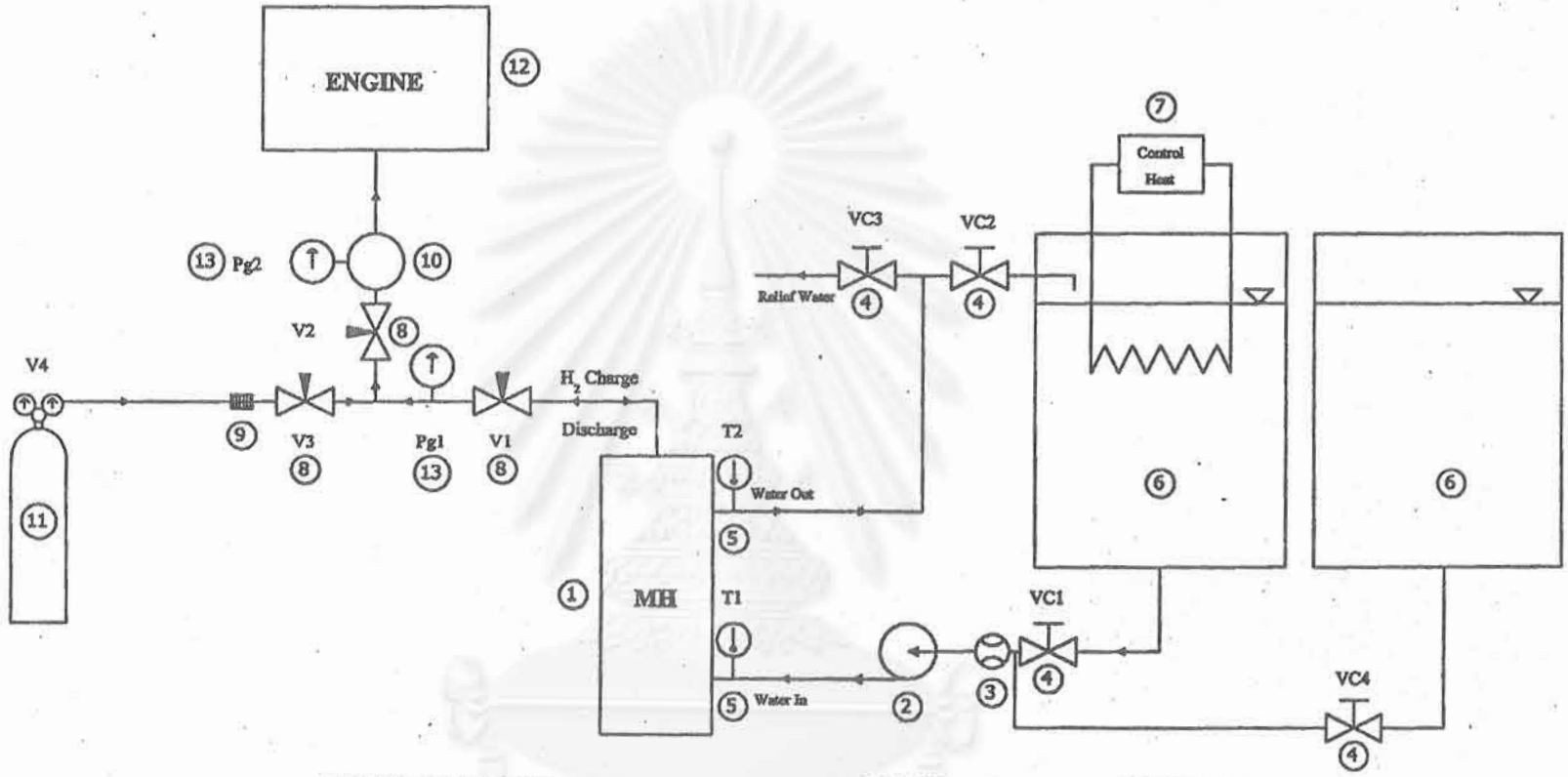
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



1. Radiators
2. Thermocouple
3. Water flow meter
4. Fan
5. Engine
6. Water pump
7. Thermostat

รูปที่ ข.3 แสดงตำแหน่งการติดเครื่องวัดอุณหภูมิและเครื่องวัดอัตราการไหลสำหรับเครื่องยนต์ไฮโดรเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



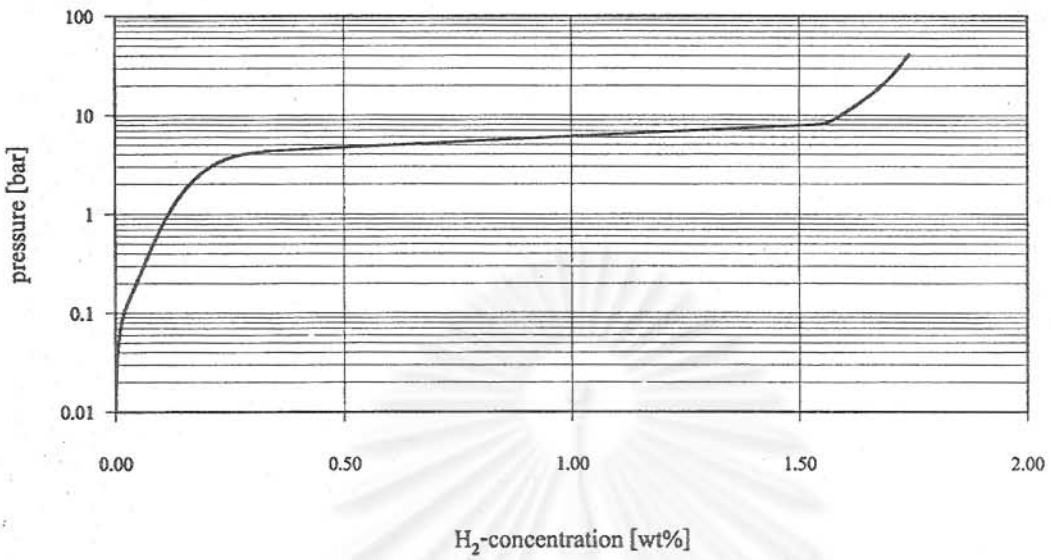
1. Metal Hydride Storage Tank
2. Pump
3. Water Flowmeter
4. Ball Valve
5. Temperature Measurement
6. Water Storage Tank
7. Control Heat System
8. Needle Vavle
9. Quick Connector
10. Regulator
11. Hydrogen High Pressure Tank
12. Engine
13. Pressure Gauge

ข.4 ผังแสดงระบบเชื้อเพลิงไฮโดรเจน และระบบน้ำหล่อเย็น

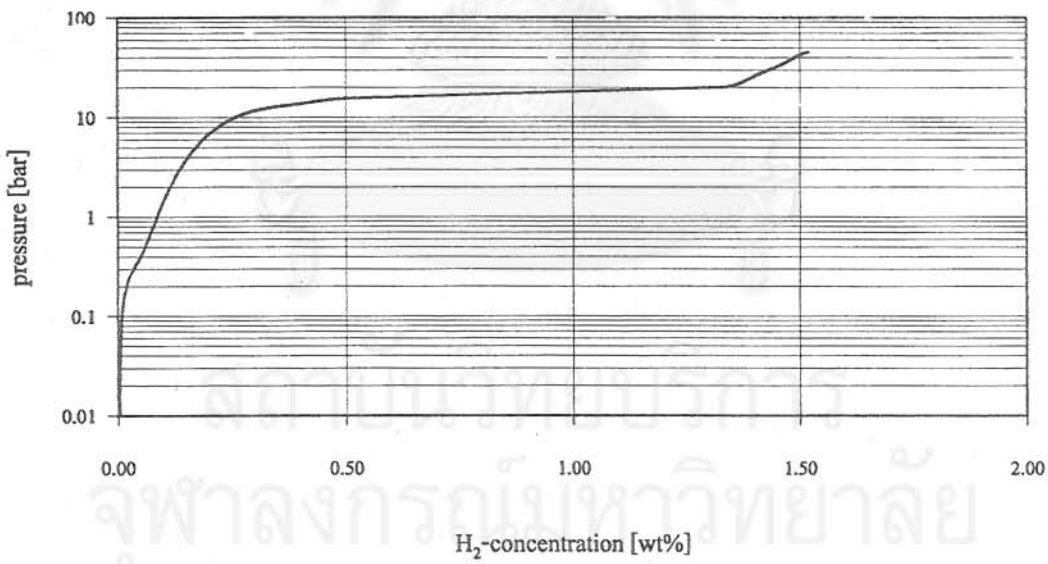
(ใช้ทดสอบเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้น)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แผนภาพ PCI ของ Hydralloy® C5

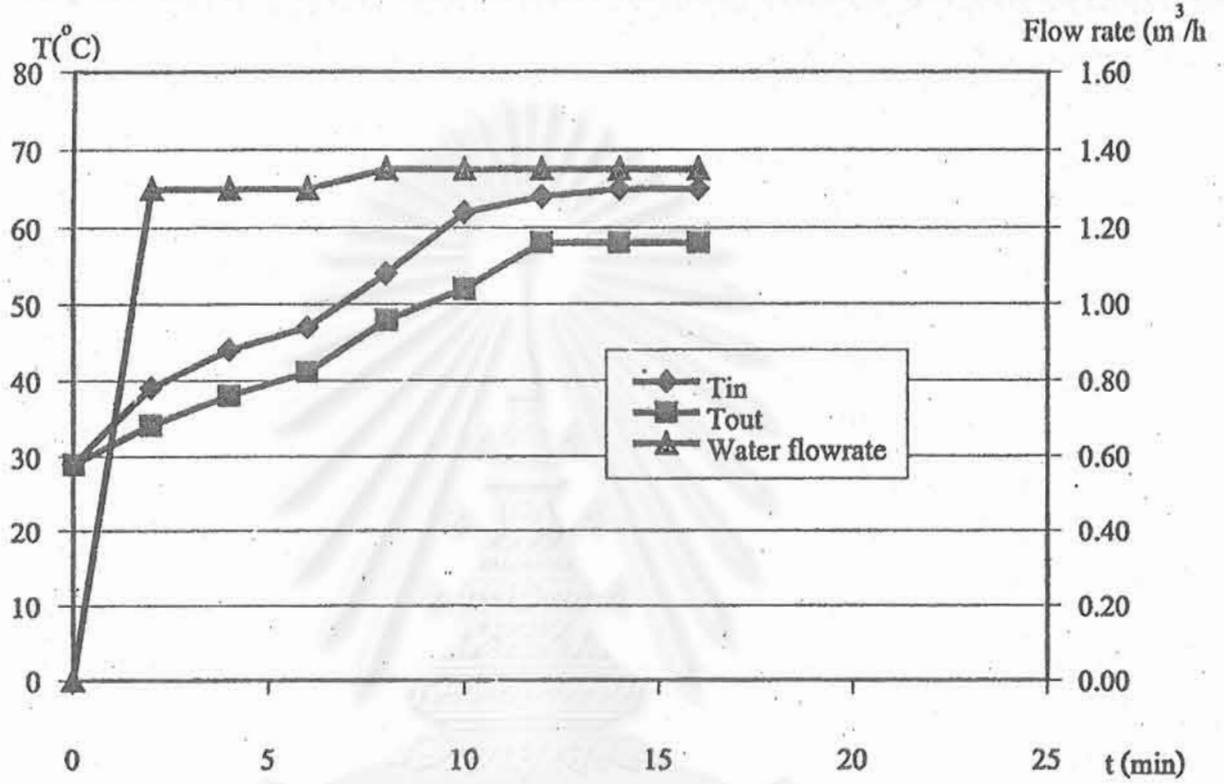


รูปที่ ก.1 การคาย (Desorption) ที่ 20°C



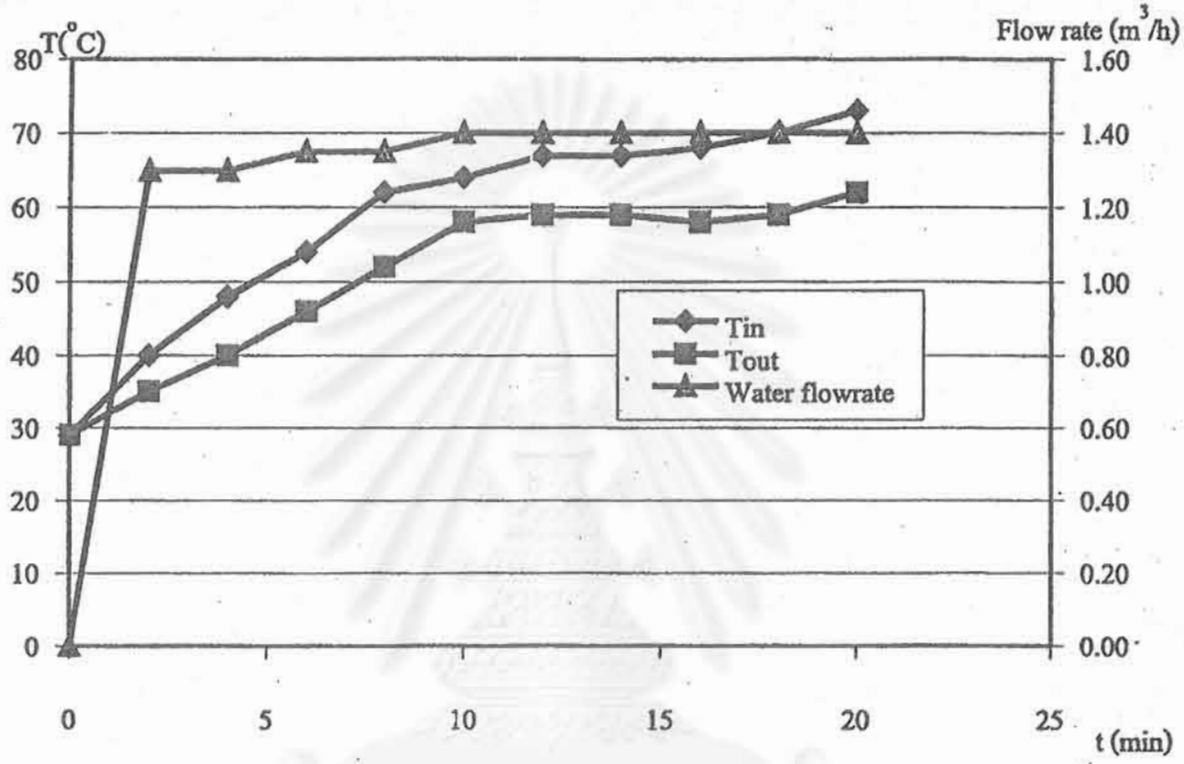
รูปที่ ข.5 แผนภาพ PCI ของ Hydralloy® C5

ภาคผนวก ค.
กราฟที่ได้จากการทดสอบ



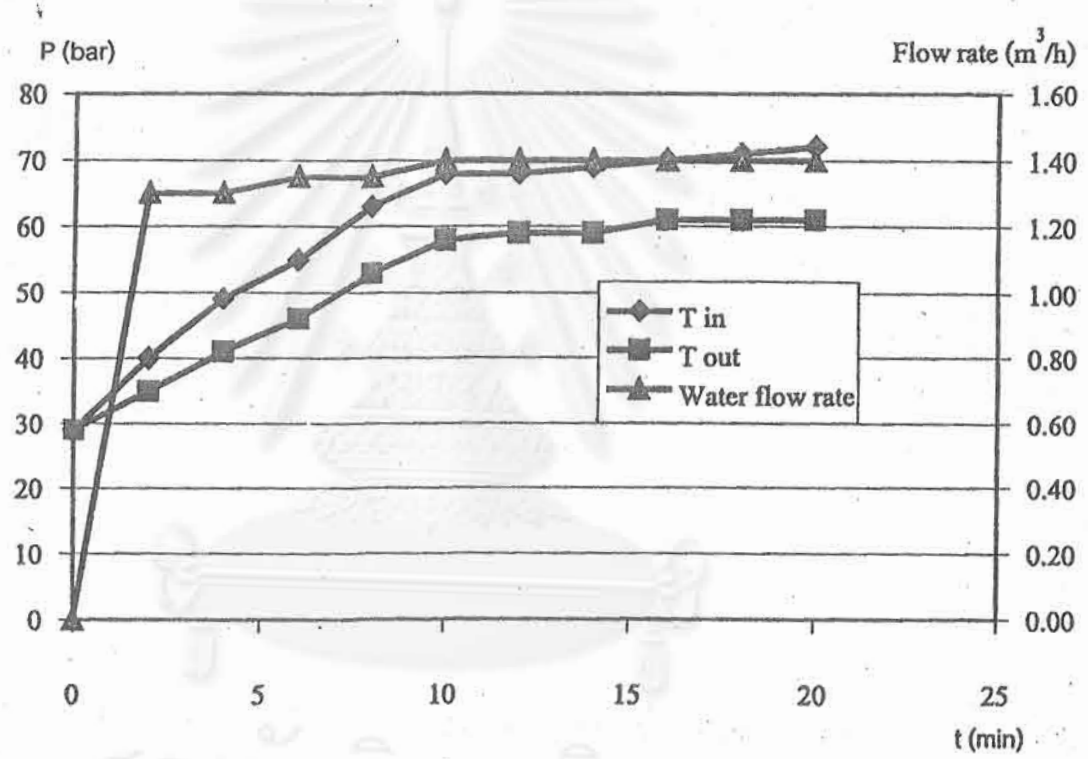
รูปที่ ค.1 ผลการทดสอบถังไฮโดรเจนความดันสูง ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

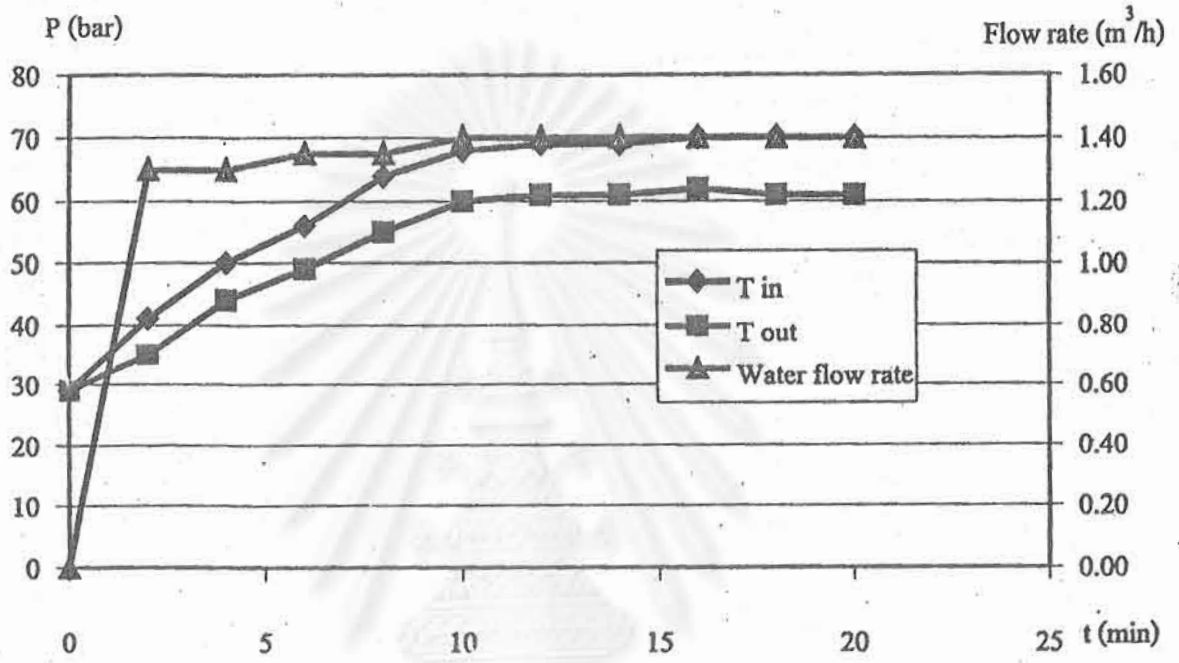


รูปที่ ค.2 ผลการทดสอบถังไฮโดรเจนความดันสูง ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

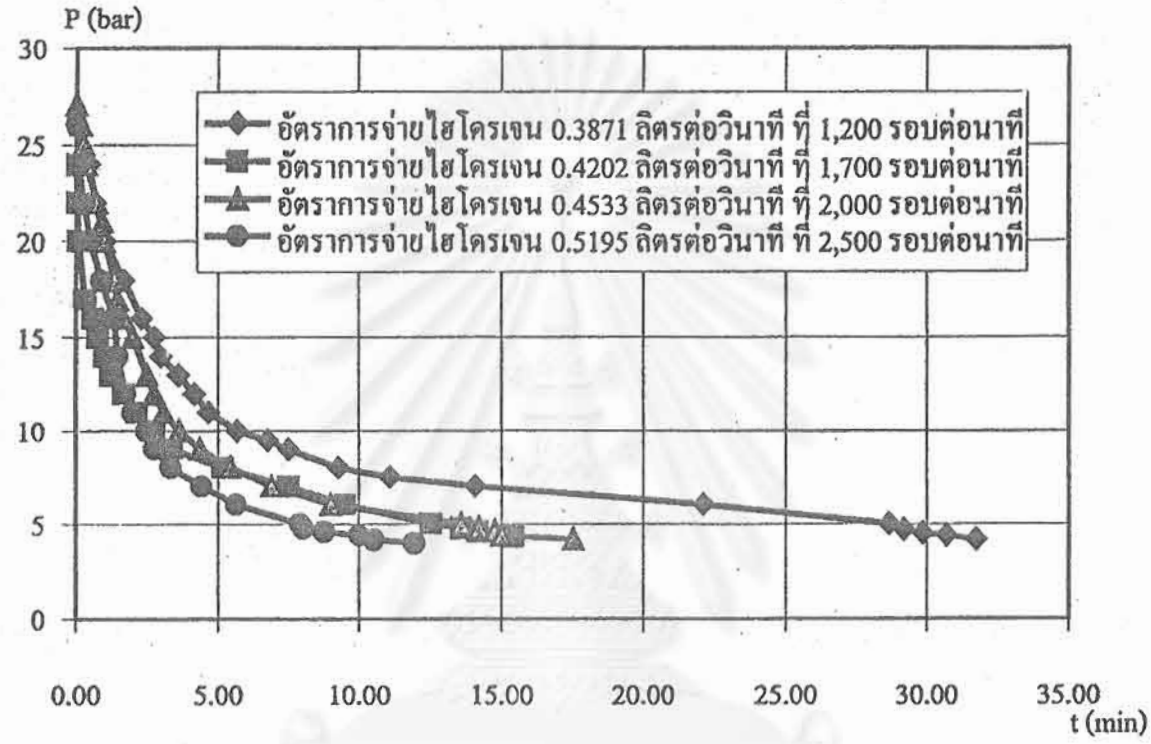


รูปที่ ค.3 ผลการทดสอบถังไฮโดรเจนความดันสูง ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32°C เครื่องยนต์ดีเซลที่ 2,000 รอบต่อนาที



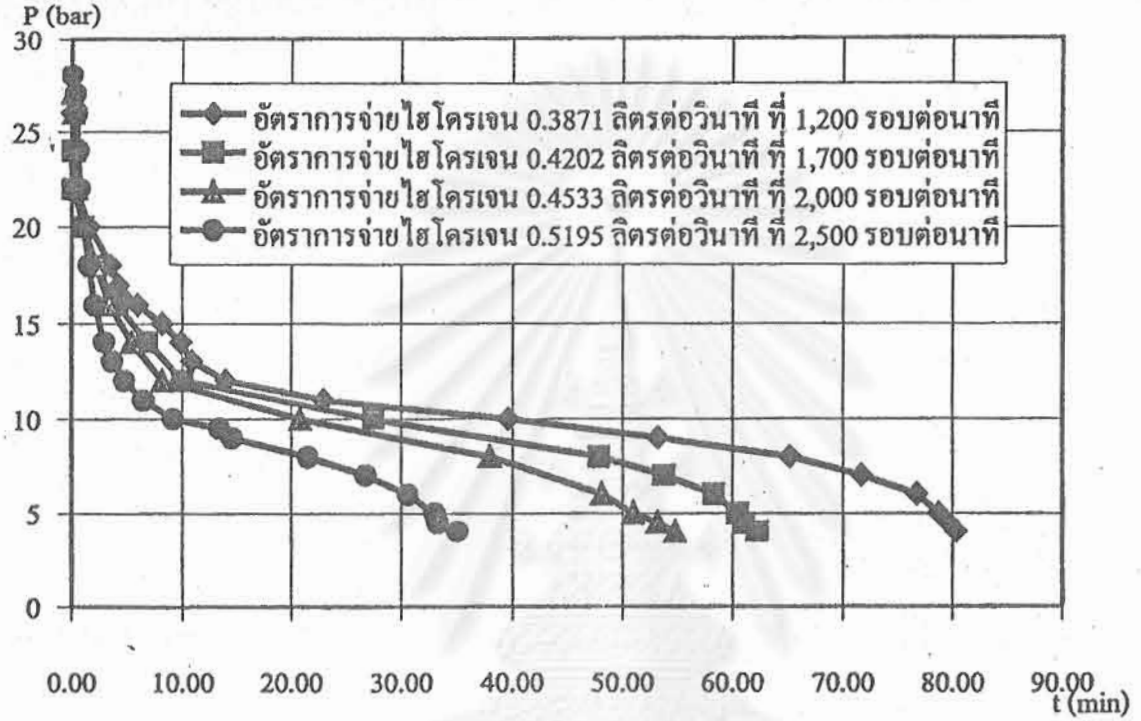
รูปที่ ค.4 ผลการทดสอบถังไฮโดรเจนความดันสูง ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32 °C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



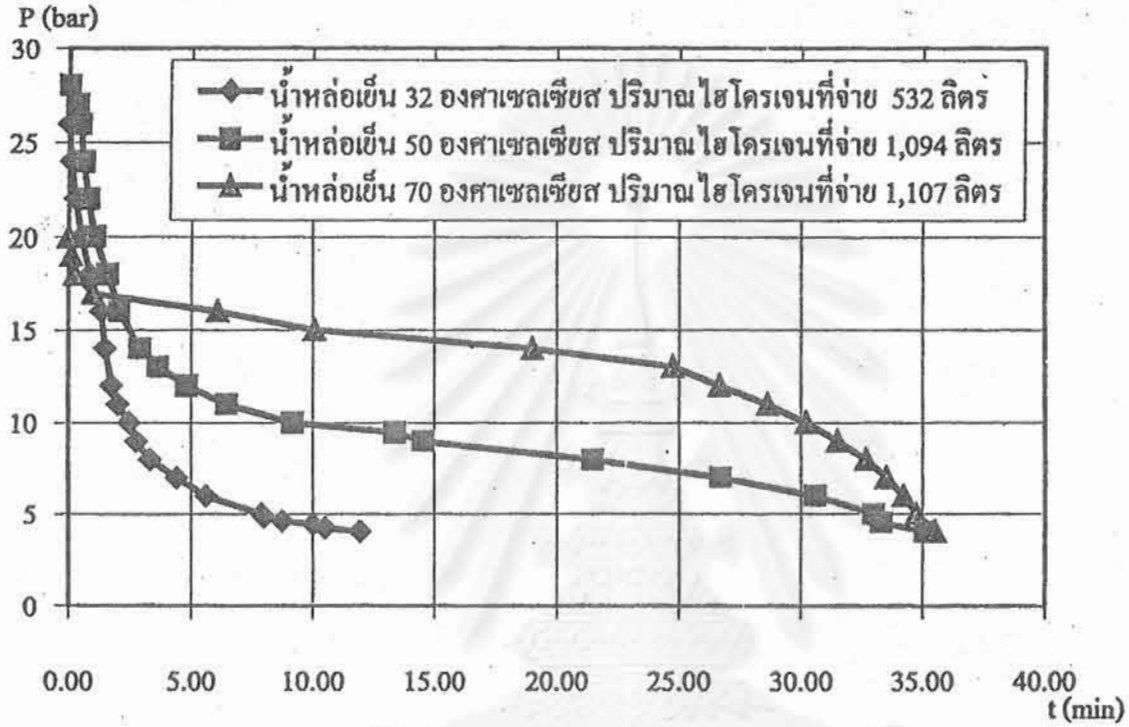
รูปที่ ค.5 เวลาที่นำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ที่อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 32 องศาเซลเซียส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



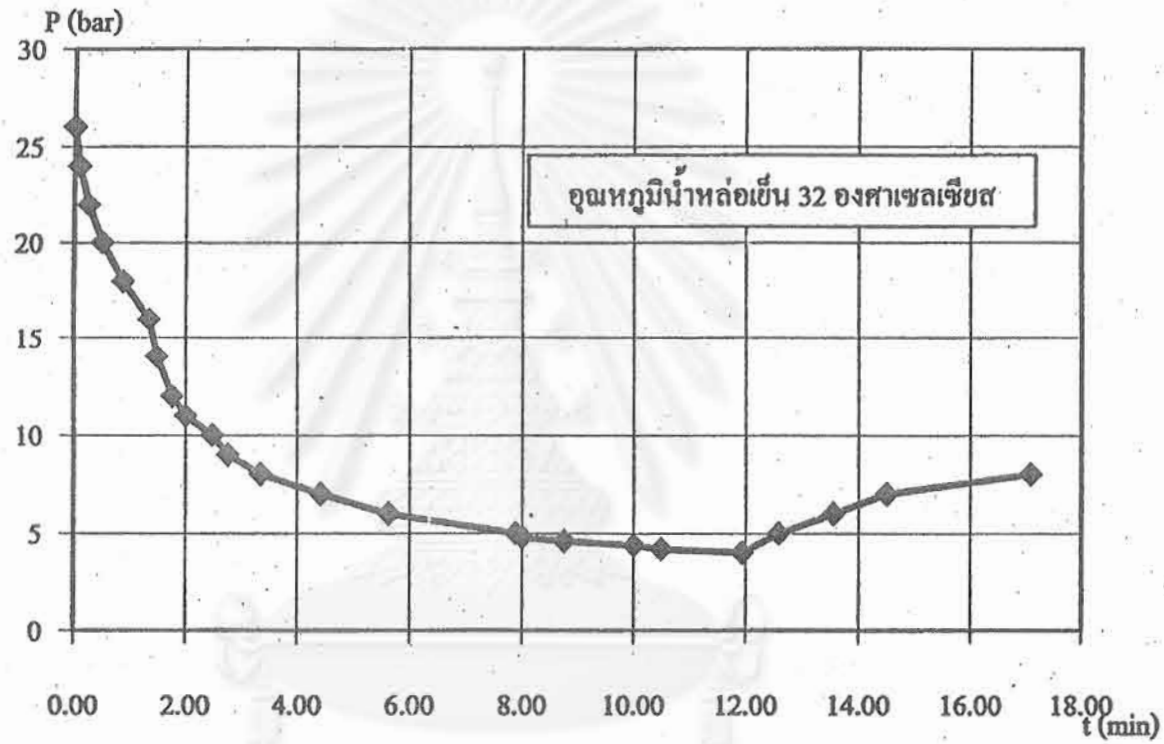
รูปที่ ค.6 เวลาที่นำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ที่อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 50 องศาเซลเซียส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



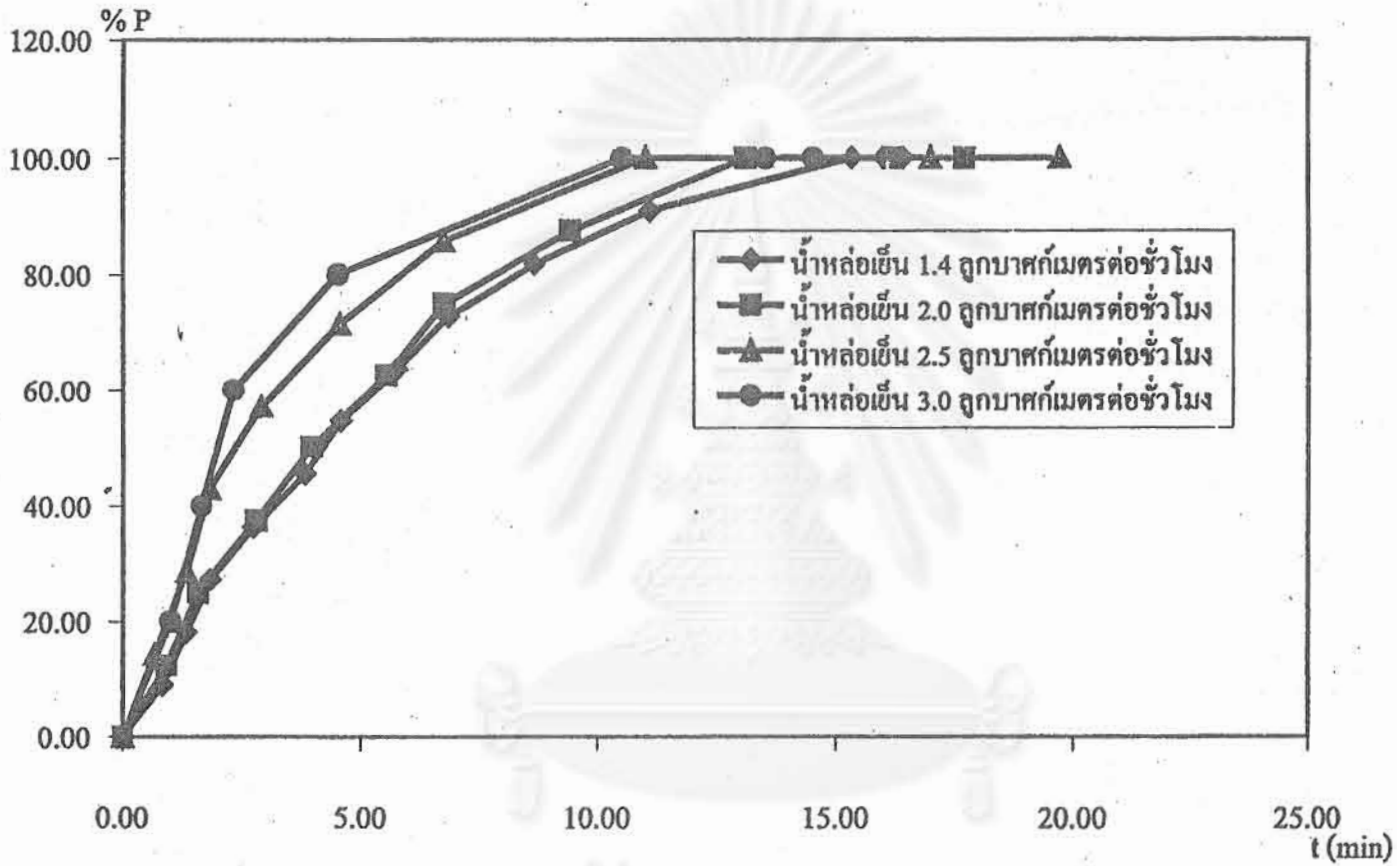
รูปที่ ค.7 เวลาที่นำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) จ่ายด้วยอัตรา 0.5195 ลิตรต่อวินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



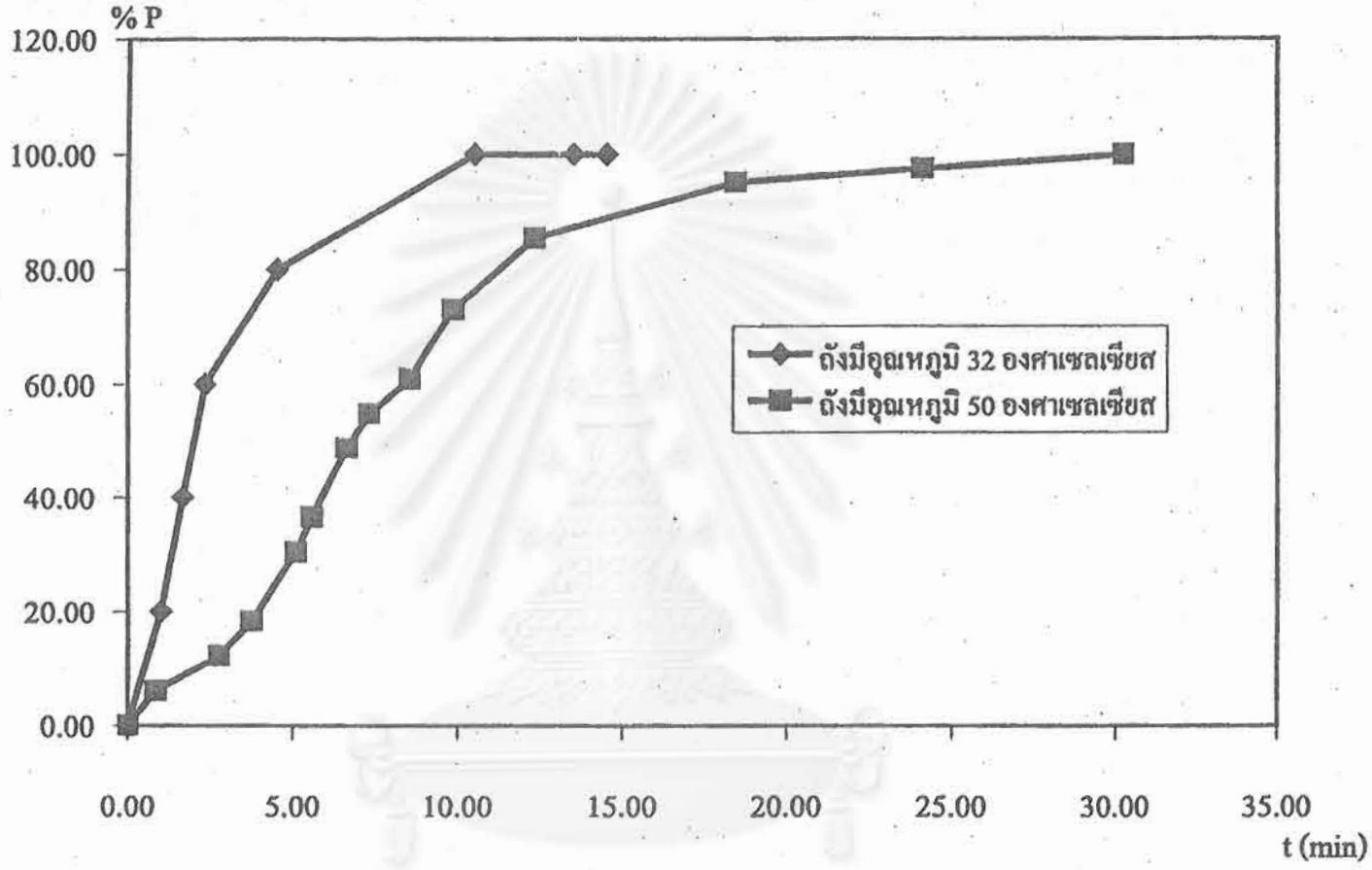
รูปที่ ค.8 แสดงความดันภายในถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ภายหลังหยุดการปล่อยก๊าซไฮโดรเจน (discharge) ขณะจ่ายด้วยอัตรา 0.5195 ลิตรต่อวินาที ที่ 4 bar

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



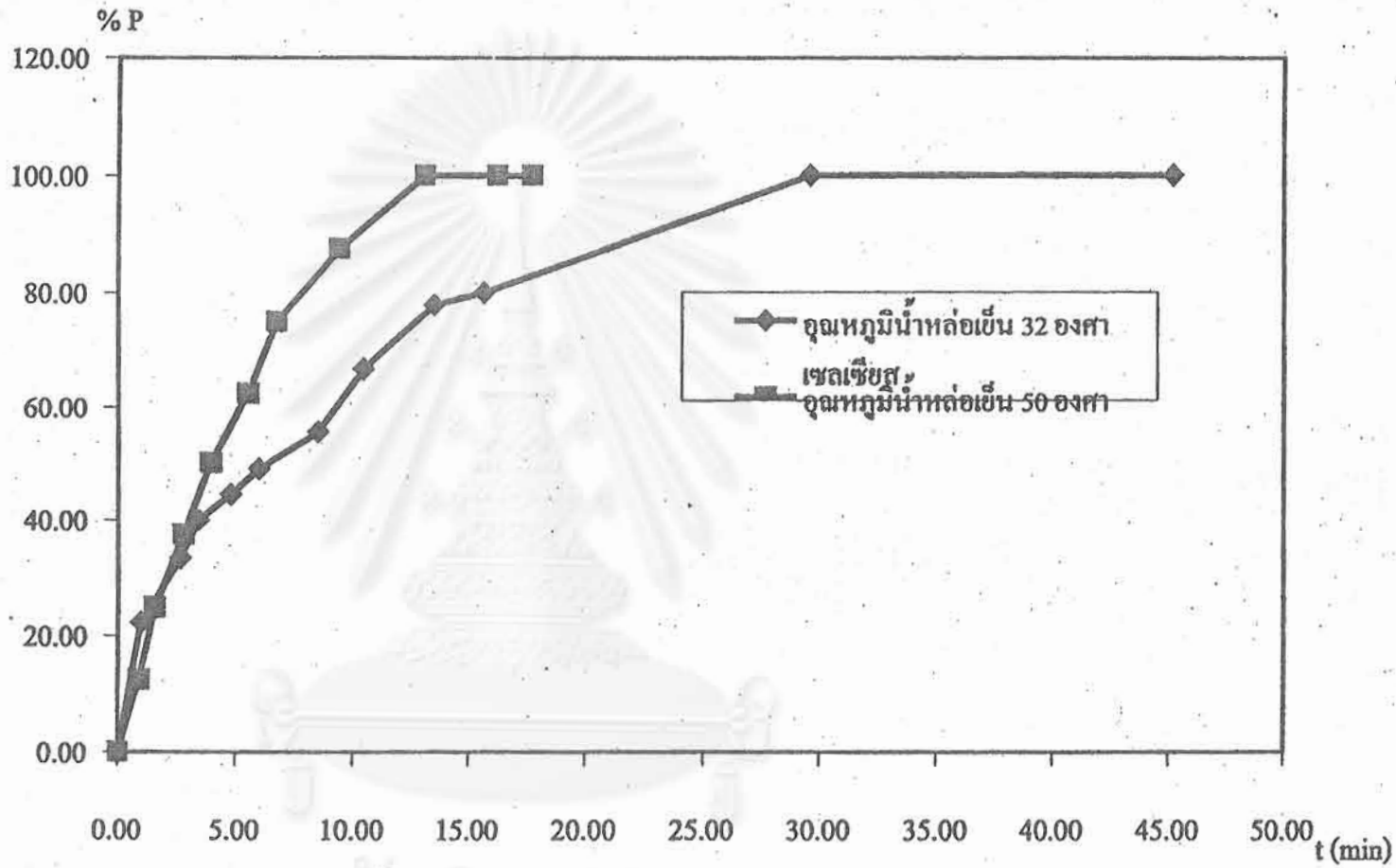
รูปที่ ค.9 เวลาที่ใช้บรรจุไฮโดรเจน (charge) เข้าถัง อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเท่ากับ 32 องศาเซลเซียส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



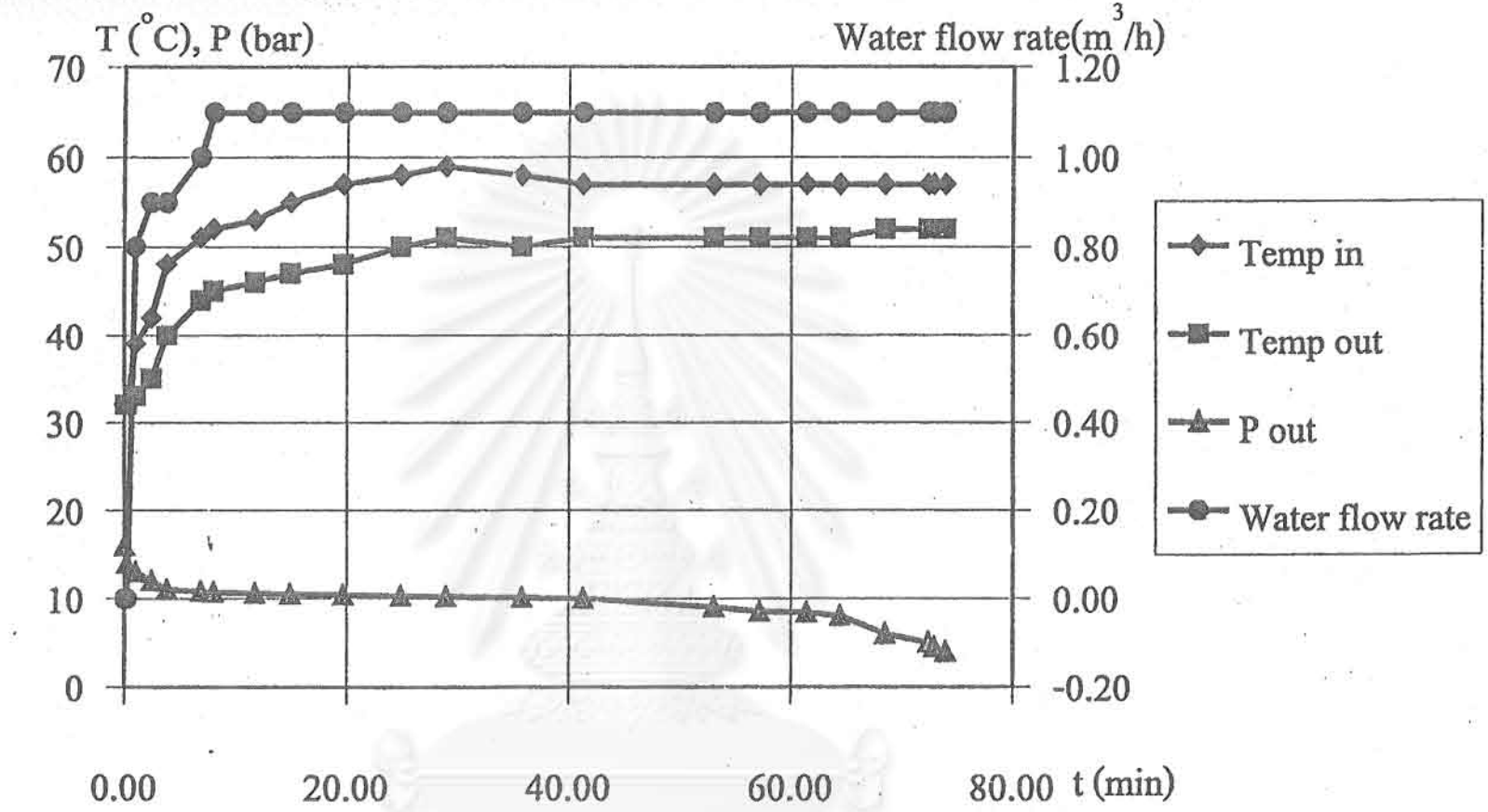
รูปที่ ค.10 เวลาที่ใช้บรรจุไฮโดรเจน (charge) ด้วยน้ำหล่อเย็น 3.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



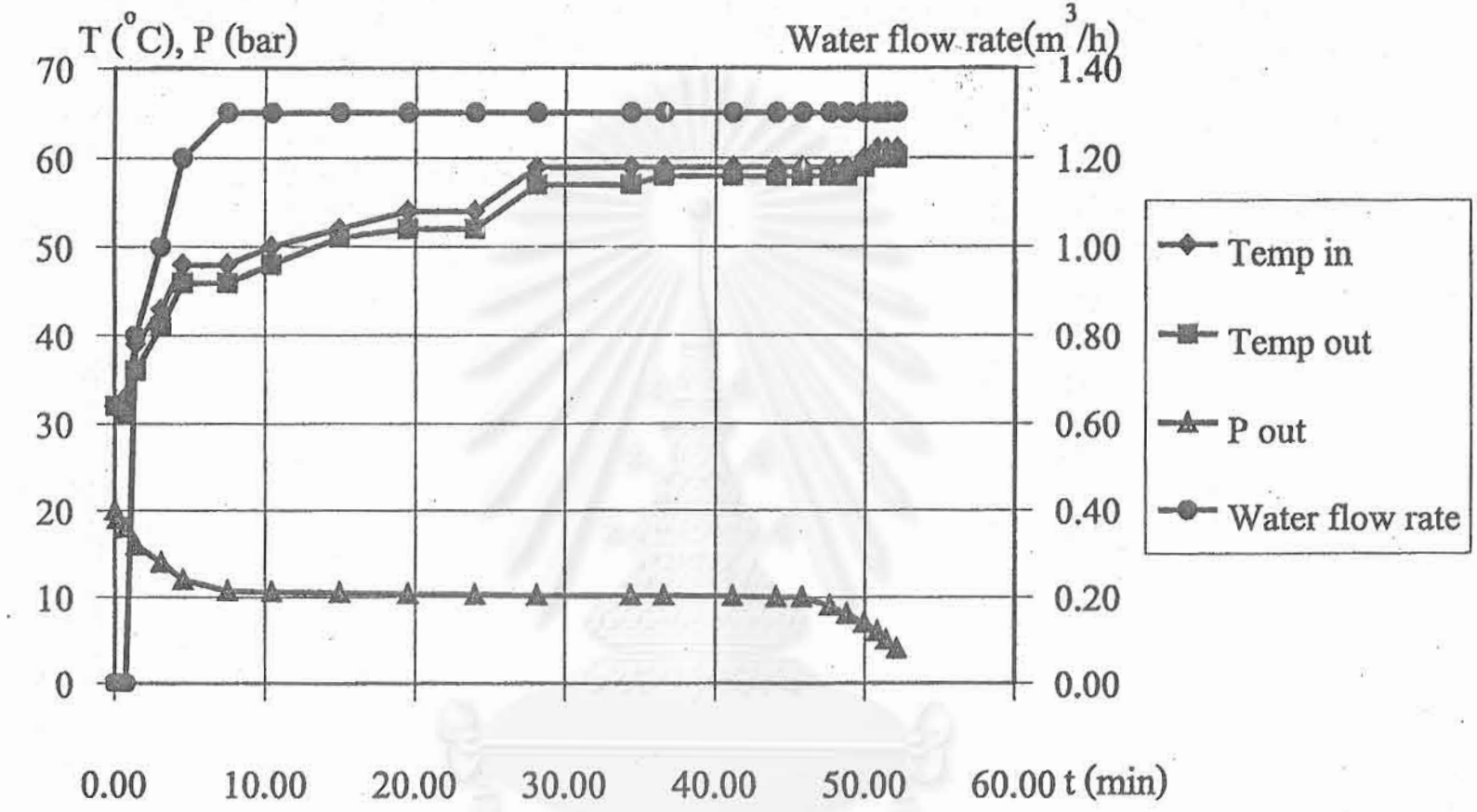
รูปที่ ค.11 เวลาที่ใช้บรรจุไฮโดรเจน (charge) ด้วยน้ำหล่อเย็น 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



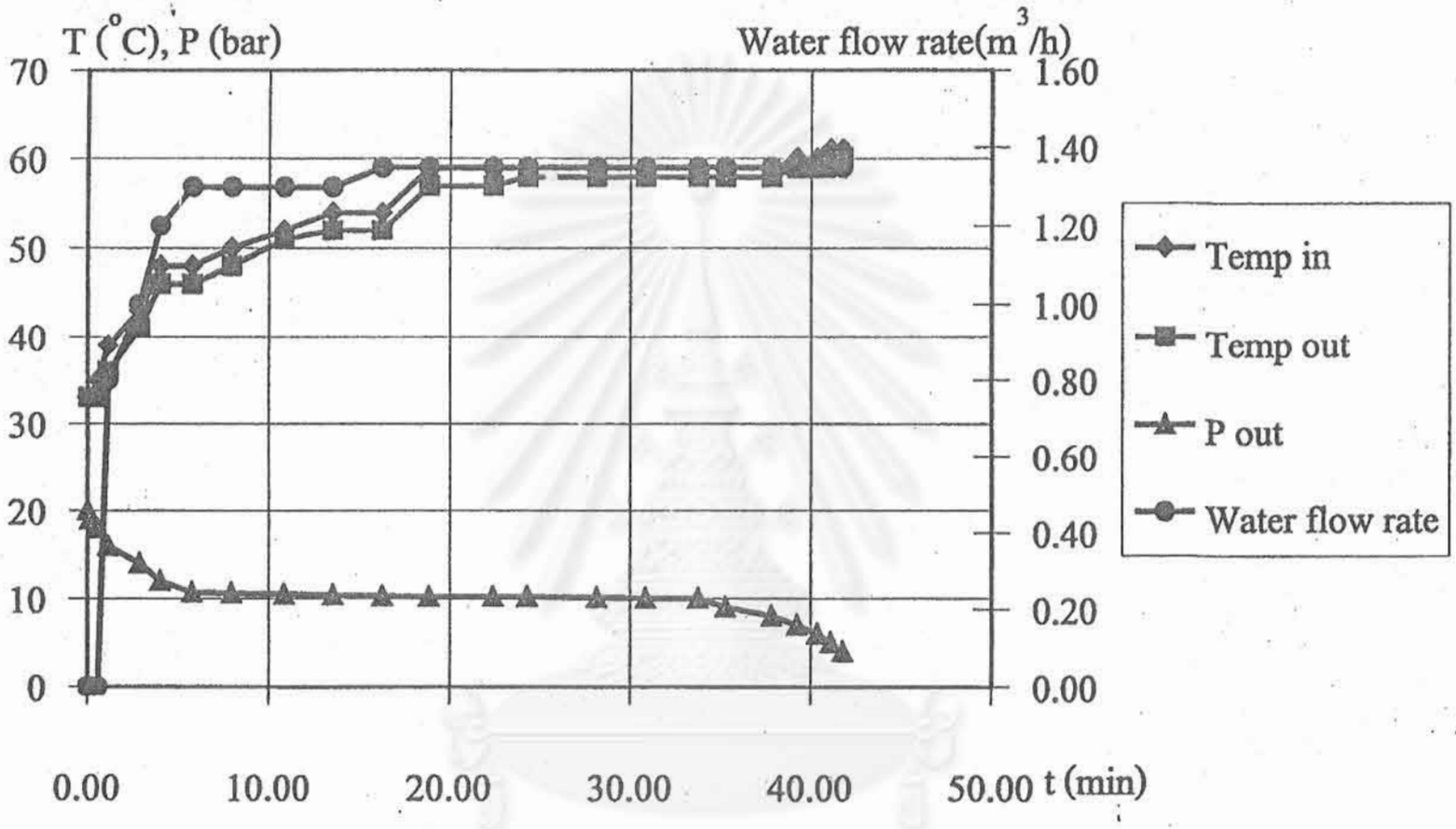
รูปที่ ค.12 เวลาที่ใช้ไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) จริงบนรถยนต์ทดสอบ จ่ายไฮโดรเจนด้วยอัตรา 0.13148 ลิตรต่อวินาที ขณะเครื่องเดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



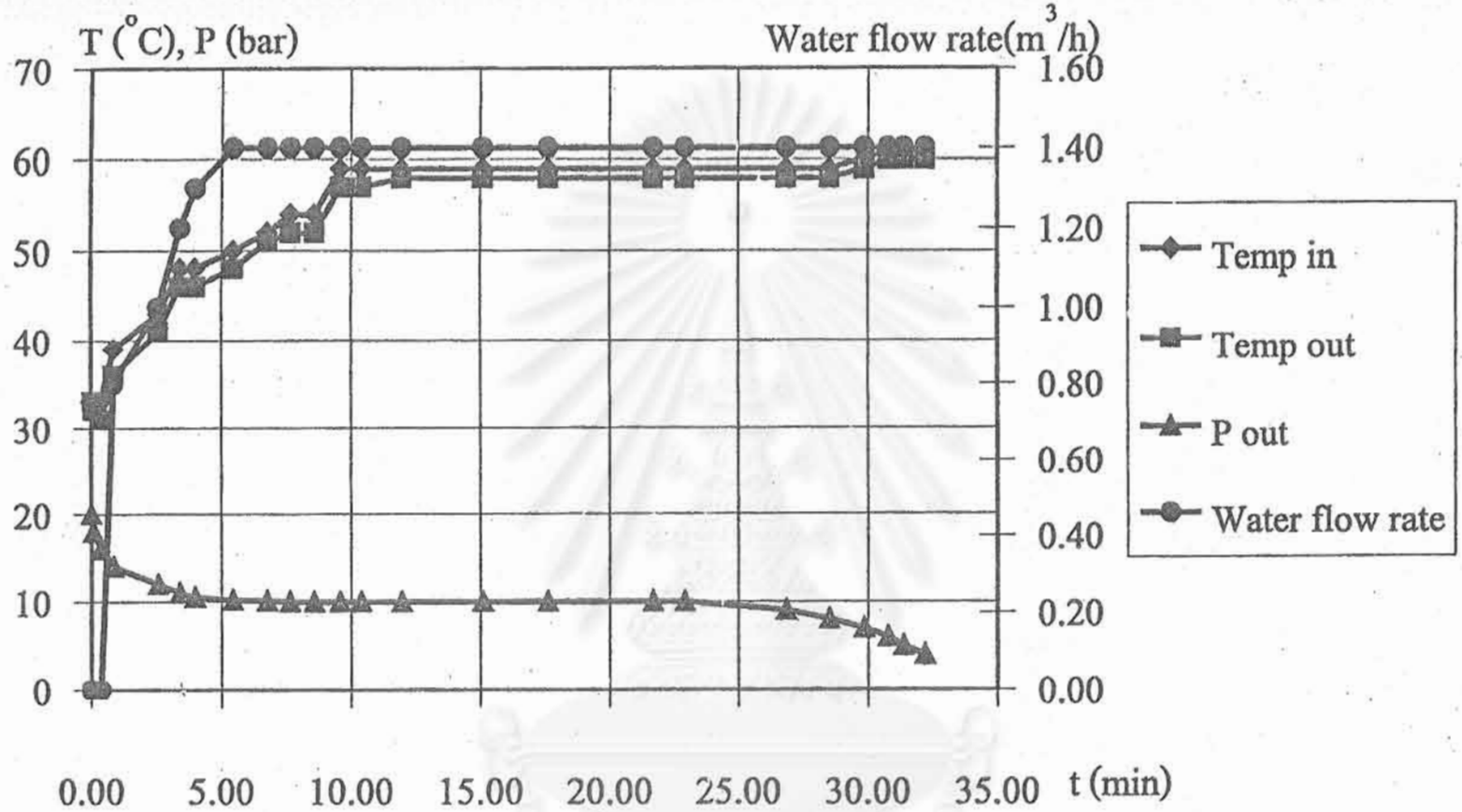
รูปที่ ค.13 เวลาที่ใช้ไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) จริงบนรถยนต์ทดสอบ จ่ายไฮโดรเจนด้วยอัตรา 0.4202 ลิตรต่อวินาที ขณะเครื่องเดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.14 เวลาที่ใช้ไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) จริงบนรถยนต์ทดสอบ จ่ายไฮโดรเจนด้วยอัตรา 0.4533 ลิตรต่อวินาที ขณะเครื่องเดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.15 เวลาที่ใช้ไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) จริงบนรถยนต์ทดสอบ จ่ายไฮโดรเจนด้วยอัตรา 0.5195 ลิตรต่อวินาที ขณะเครื่องเดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.

ตารางผลการทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ตาราง ง-1 ผลการทดสอบของถังไฮโดรเจนความดันสูง
ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0	29	29	0	0.3871	0.00
2	39	34	5	0.3871	1.30
4	44	38	6	0.3871	1.30
6	47	41	6	0.3871	1.30
8	54	48	6	0.3871	1.35
10	62	52	10	0.3871	1.35
12	64	58	6	0.3871	1.35
14	65	58	7	0.3871	1.35
16	65	58	7	0.3871	1.35

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-2 ผลการทดสอบของถังไฮโดรเจนความดันสูง
ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0	29	29	0	0.4202	0.00
2	40	35	5	0.4202	1.30
4	48	40	8	0.4202	1.30
6	54	46	8	0.4202	1.35
8	62	52	10	0.4202	1.35
10	64	58	6	0.4202	1.40
12	67	59	8	0.4202	1.40
14	67	59	8	0.4202	1.40
16	68	58	10	0.4202	1.40
18	70	59	11	0.4202	1.40
20	73	62	11	0.4202	1.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-3 ผลการทดสอบของถังไฮโดรเจนความดันสูง
ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0	29	29	0	0.4533	0.00
2	40	35	5	0.4533	1.30
4	49	41	8	0.4533	1.30
6	55	46	9	0.4533	1.35
8	63	53	10	0.4533	1.35
10	68	58	10	0.4533	1.40
12	68	59	9	0.4533	1.40
14	69	59	10	0.4533	1.40
16	70	61	9	0.4533	1.40
18	71	61	10	0.4533	1.40
20	72	61	11	0.4533	1.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-4 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังไฮโดรเจนความดันสูง ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 32°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0	29	29	0	0.5195	0.00
2	41	35	6	0.5195	1.30
4	50	44	6	0.5195	1.30
6	56	49	7	0.5195	1.35
8	64	55	9	0.5195	1.35
10	68	60	8	0.5195	1.40
12	69	61	8	0.5195	1.40
14	69	61	8	0.5195	1.40
16	70	62	8	0.5195	1.40
18	70	61	9	0.5195	1.40
20	70	61	9	0.5195	1.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-5 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 32°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0.00	33	33	0	26	0.3871	1.40
0.45	33	33	0	24	0.3871	1.40
0.67	33	32	1	22	0.3871	1.40
1.00	33	32	1	20	0.3871	1.40
1.67	33	32	1	18	0.3871	1.40
2.30	33	32	1	16	0.3871	1.40
3.00	33	31	2	14	0.3871	1.40
4.17	32	31	1	12	0.3871	1.40
5.67	32	31	1	10	0.3871	1.40
9.25	31	30	1	8	0.3871	1.40
22.12	31	30	1	6	0.3871	1.40
28.67	32	30	2	5	0.3871	1.40
31.72	31	30	1	4	0.3871	1.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-6 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 32°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0.00	32	32	0	24	0.4202	1.40
0.03	32	32	0	22	0.4202	1.40
0.08	32	32	0	20	0.4202	1.40
0.58	32	32	0	16	0.4202	1.40
1.00	32	32	0	14	0.4202	1.40
1.67	32	31	1	12	0.4202	1.40
2.77	32	31	1	10	0.4202	1.40
5.17	32	31	1	8	0.4202	1.40
9.50	32	31	1	6	0.4202	1.40
12.50	32	31	1	5	0.4202	1.40
15.42	31	31	0	4	0.4202	1.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-7 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 32°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0.00	33	33	0	27	0.4533	1.40
0.15	33	33	0	26	0.4533	1.40
0.35	33	32	1	24	0.4533	1.40
0.70	33	32	1	22	0.4533	1.40
0.98	33	32	1	20	0.4533	1.40
1.33	33	32	1	18	0.4533	1.40
1.67	33	32	1	16	0.4533	1.40
2.25	33	32	1	14	0.4533	1.40
2.75	33	31	2	12	0.4533	1.40
3.63	33	31	2	10	0.4533	1.40
5.42	32	31	1	8	0.4533	1.40
9.00	32	31	1	6	0.4533	1.40
13.58	31	30	1	5	0.4533	1.40
17.50	31	30	1	4	0.4533	1.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-8 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 32°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0.00	33	33	0	26	0.5195	1.40
0.08	33	32	1	24	0.5195	1.40
0.25	33	32	1	22	0.5195	1.40
0.50	33	32	1	20	0.5195	1.40
0.87	33	32	1	18	0.5195	1.40
1.33	33	32	1	16	0.5195	1.40
1.47	33	32	1	14	0.5195	1.40
1.75	33	32	1	12	0.5195	1.40
2.47	33	32	1	10	0.5195	1.40
3.33	33	32	1	8	0.5195	1.40
5.63	32	31	1	6	0.5195	1.40
7.88	32	31	1	5	0.5195	1.40
11.93	30	29	1	4	0.5195	1.40
12.58	30	29	1	5	0.5195	1.40
13.57	30	29	1	6	0.5195	1.40
14.50	30	29.5	0.5	7	0.5195	1.40
17.08	30	30	0	8	0.5195	1.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-9 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 50°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0.00	50	50	0	26	0.3871	1.40
0.17	49	49	0	24	0.3871	1.40
0.33	49	48	1	22	0.3871	1.40
1.67	49	47	2	20	0.3871	1.40
3.55	48	46	2	18	0.3871	1.40
5.98	47	45	2	16	0.3871	1.40
9.87	47	45	2	14	0.3871	1.40
13.98	49	47	2	12	0.3871	1.40
39.63	49	47	2	10	0.3871	1.40
65.17	48	47	1	8	0.3871	1.40
76.70	48	47	1	6	0.3871	1.40
78.70	48	47	1	5	0.3871	1.40
80.27	48	47	1	4	0.3871	1.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-10 การทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 50°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0.00	50	50	0	24	0.4202	1.40
0.10	50	50	0	22	0.4202	1.40
1.10	50	50	0	20	0.4202	1.40
2.23	51	50	1	18	0.4202	1.40
4.12	52	50	2	16	0.4202	1.40
6.83	52	50	2	14	0.4202	1.40
10.00	52	49	3	12	0.4202	1.40
27.42	51	50	1	10	0.4202	1.40
47.88	50	49	1	8	0.4202	1.40
58.27	49	48	1	6	0.4202	1.40
60.43	49	48	1	5	0.4202	1.40
62.25	49	48	1	4	0.4202	1.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-11 การทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 50°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0.13	50	50	0	26	0.4533	1.40
0.27	50	50	0	24	0.4533	1.40
0.42	51	50	1	22	0.4533	1.40
1.15	52	50	2	20	0.4533	1.40
2.17	52	49	3	18	0.4533	1.40
3.42	51	50	1	16	0.4533	1.40
5.43	52	50	2	14	0.4533	1.40
8.18	51	50	1	12	0.4533	1.40
20.75	50	49	1	10	0.4533	1.40
37.98	49	48	1	8	0.4533	1.40
48.07	49	48	1	6	0.4533	1.40
50.93	49	48	1	5	0.4533	1.40
54.72	49	48	1	4	0.4533	1.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-12 การทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 50°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0.00	50	50	0	28	0.5195	1.40
0.30	50	50	0	27	0.5195	1.40
0.47	51	51	0	26	0.5195	1.40
0.58	51	50	1	24	0.5195	1.40
0.77	52	50	2	22	0.5195	1.40
1.03	52	50	2	20	0.5195	1.40
1.58	52	49	3	18	0.5195	1.40
2.08	51	50	1	16	0.5195	1.40
2.92	52	50	2	14	0.5195	1.40
4.80	51	50	1	12	0.5195	1.40
9.17	50	49	1	10	0.5195	1.40
21.48	49	48	1	8	0.5195	1.40
30.58	49	48	1	6	0.5195	1.40
32.98	49	48	1	5	0.5195	1.40
35.10	49	48	1	4	0.5195	1.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-13 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 70°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0.00	69	69	0	20	0.5195	1.40
0.25	69	69	0	18	0.5195	1.40
6.08	69	68	1	16	0.5195	1.40
18.98	68	67	1	14	0.5195	1.40
26.63	68	67	1	12	0.5195	1.40
30.22	68	67	1	10	0.5195	1.40
32.67	68	67	1	8	0.5195	1.40
34.20	68	67	1	6	0.5195	1.40
34.73	68	67	1	5	0.5195	1.40
35.50	68	67	1	4	0.5195	1.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-14 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าถัง ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 32°C อุณหภูมิถัง 32°C อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	% P	Water flow rate (m^3/h)
0.00	32	32	0	0.0	0.00	1.4
0.83	32	32	0	5.0	9.09	1.4
1.33	32	33	1	10.0	18.18	1.4
1.85	32	33	1	15.0	27.27	1.4
2.75	32	33	1	20.0	36.36	1.4
3.83	32	33	1	25.0	45.45	1.4
4.58	32	33	1	30.0	54.55	1.4
5.75	32	33	1	30.0	63.64	1.4
6.83	32	33	1	30.0	72.73	1.4
8.67	32	33	1	30.0	81.82	1.4
11.08	32	32.5	0.5	30.0	90.91	1.4
15.33	32	32.5	0.5	30.0	100.00	1.4
16.00	32	32	0	30.0	100.00	1.4
16.42	32	32	0	30.0	100.00	1.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-15 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าถัง ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 32°C อุณหภูมิถัง 32°C อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	% P	Water flow rate (m^3/h)
0.00	31	31	0	0.0	0.00	2.0
0.92	31	31	0	5.0	12.50	2.0
1.58	32	33	1	10.0	25.00	2.0
2.82	32	33	1	15.0	37.50	2.0
3.97	32	33	1	20.0	50.00	2.0
5.53	32	33	1	25.0	62.50	2.0
6.75	32	33	1	30.0	75.00	2.0
9.42	32	33	1	30.0	87.50	2.0
13.08	32	32.5	0.5	30.0	100.0	2.0
16.20	32	32.5	0.5	30.0	100.0	2.0
17.72	32	32	0	30.0	100.0	2.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-16 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าถัง ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 32°C อุณหภูมิถัง 32°C อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	% P	Water flow rate (m^3/h)
0.00	33	33	0	0.0	0.00	2.5
0.67	33	33	0	5.0	14.29	2.5
1.33	33	33	0	10.0	28.57	2.5
1.83	33	34	1	15.0	42.86	2.5
2.92	32	33	1	20.0	57.14	2.5
4.55	32	33	1	25.0	71.43	2.5
6.73	32	33	1	30.0	85.71	2.5
11.00	32	33	1	30.0	100.0	2.5
17.00	32	32	0	30.0	100.0	2.5
19.72	32	32	0	30.0	100.0	2.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-17 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าถัง ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 32°C อุณหภูมิถัง 32°C อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 3.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	% P	Water flow rate (m^3/h)
0.00	32	33	0	0.0	0.00	3.0
1.00	32	33	1	5.0	20.0	3.0
1.67	32	34	2	10.0	40.0	3.0
2.33	33	34	1	15.0	60.0	3.0
4.50	33	34	1	20.0	80.0	3.0
10.50	33	34	1	25.0	100.0	3.0
13.50	33	33	0	25.0	100.0	3.0
14.50	33	33	0	25.0	100.0	3.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-18 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าถัง ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 32°C อุณหภูมิถัง 50°C อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 3.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

T (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	% P	Water flow rate (m^3/h)
0.00	32	32	0	0.0	0.00	3.0
0.83	31	31	0	5.0	6.10	3.0
2.78	30	32	2	10.0	12.20	3.0
3.75	30	32	2	15.0	18.29	3.0
5.10	32	33	1	25.0	30.49	3.0
5.57	32	33	1	30.0	36.59	3.0
6.60	32	33	1	30.0	48.78	3.0
7.30	32	33	1	30.0	54.88	3.0
8.52	32	33	1	30.0	60.98	3.0
9.83	32	33	1	30.0	73.17	3.0
12.33	33	33	1	30.0	85.37	3.0
18.42	33	34	1	30.0	95.12	3.0
24.08	33	34	1	30.0	97.56	3.0
30.25	33	33	0	30.0	100.0	3.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-19 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุไฮโดรเจนเข้าถัง ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 50°C อุณหภูมิถัง 32°C อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	% P	Water flow rate (m^3/h)
0.00	50	50	0	0	0.00	2.0
1.00	50	50	0	10	22.22	2.0
2.67	50	51	1	15	33.33	2.0
3.43	50	51	1	18	40.00	2.0
4.80	51	52	1	20	44.44	2.0
6.00	51	52	1	25	48.89	2.0
8.50	51	52	1	30	55.56	2.0
10.43	51	52	1	30	66.67	2.0
13.50	51	52	1	30	77.78	2.0
15.65	51	52	1	30	80.00	2.0
29.57	51	52	1	30	100.00	2.0
45.17	51	51	0	30	100.00	2.0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ง-20 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน เมื่อต่อกับหม้อน้ำในรถยนต์ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0.00	32	32	0	16	0.3871	0.00
0.22	32	32	0	14	0.3871	0.00
1.00	39	33	6	13	0.3871	0.80
2.42	42	35	7	12	0.3871	0.90
3.80	48	40	8	11	0.3871	0.90
6.82	51	44	7	10.8	0.3871	1.00
8.00	52	45	7	10.7	0.3871	1.10
11.75	53	46	7	10.6	0.3871	1.10
14.93	55	47	8	10.5	0.3871	1.10
19.65	57	48	9	10.4	0.3871	1.10
24.87	58	50	8	10.3	0.3871	1.10
28.97	59	51	8	10.2	0.3871	1.10
35.75	58	50	8	10.1	0.3871	1.10
41.30	57	51	6	10	0.3871	1.10
53.05	57	51	6	9	0.3871	1.10
57.17	57	51	6	8.5	0.3871	1.10
61.38	57	51	6	8.4	0.3871	1.10
64.42	57	51	6	8	0.3871	1.10
68.50	57	52	5	6	0.3871	1.10
72.38	57	52	5	5	0.3871	1.10
72.90	57	52	5	4.5	0.3871	1.10
73.93	57	52	5	4	0.3871	1.10

ตาราง ง-21 ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน เมื่อต่อกับหม้อน้ำในรถยนต์ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0.00	32	32	0	20	0.4202	0.00
0.17	32	32	0	19	0.4202	0.00
0.75	33	31	2	18	0.4202	0.00
1.40	39	36	3	16	0.4202	0.80
3.07	43	41	2	14	0.4202	1.00
4.50	48	46	2	12	0.4202	1.20
7.47	48	46	2	10.7	0.4202	1.30
10.42	50	48	2	10.6	0.4202	1.30
14.95	52	51	1	10.5	0.4202	1.30
19.50	54	52	2	10.4	0.4202	1.30
24.00	54	52	2	10.3	0.4202	1.30
28.13	59	57	2	10.2	0.4202	1.30
34.40	59	57	2	10.2	0.4202	1.30
36.58	59	58	1	10.2	0.4202	1.30
41.17	59	58	1	10.1	0.4202	1.30
44.07	59	58	1	10	0.4202	1.30
45.80	59	58	1	10	0.4202	1.30
47.63	59	58	1	9	0.4202	1.30
48.78	59	58	1	8	0.4202	1.30
49.95	60	59	1	7	0.4202	1.30
50.82	61	60	1	6	0.4202	1.30
51.42	61	60	1	5	0.4202	1.30
52.15	61	60	1	4	0.4202	1.30

ตาราง ง-22 การทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน
เมื่อต่อกับหม้อน้ำในรถยนต์ อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0.00	33	33	0	20	0.4533	0.00
0.13	33	33	0	19	0.4533	0.00
0.56	35	33	2	18	0.4533	0.00
1.13	39	36	3	16	0.4533	0.80
2.83	43	41	2	14	0.4533	1.00
3.96	48	46	2	12	0.4533	1.20
5.73	48	46	2	10.7	0.4533	1.30
7.93	50	48	2	106	0.4533	1.30
10.86	52	51	1	10.5	0.4533	1.30
13.58	54	52	2	10.4	0.4533	1.30
16.29	54	52	2	10.3	0.4533	1.35
18.85	59	57	2	10.2	0.4533	1.35
22.39	59	57	2	10.2	0.4533	1.35
24.28	59	58	1	10.2	0.4533	1.35
28.13	59	58	1	10.1	0.4533	1.35
30.84	59	58	1	10	0.4533	1.35
33.73	59	58	1	10	0.4533	1.35
35.27	59	58	1	9	0.4533	1.35
37.81	59	58	1	8	0.4533	1.35
39.23	60	59	1	7	0.4533	1.35
40.33	60	59	1	6	0.4533	1.35
41.09	61	60	1	5	0.4533	1.35
41.76	61	60	1	4	0.4533	1.35

ตาราง ง-23 การทดสอบสมรรถนะของถังเทมัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยไฮโดรเจน เมื่อต่อกับหม้อน้ำในรถยนต์ อุณหภูมิบรรยากาศ 34°C เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที

t (min)	$Temp_{in}$ (°C)	$Temp_{out}$ (°C)	ΔT (°C)	P_{out} (bar)	Gas flow rate (liter/s)	Water flow rate (m^3/h)
0.00	33	33	0	20	0.5195	0.00
0.08	32	32	0	18	0.5195	0.00
0.37	33	31	2	16	0.5195	0.00
0.85	39	36	3	14	0.5195	0.80
2.58	43	41	2	12	0.5195	1.00
3.42	48	46	2	11	0.5195	1.20
3.98	48	46	2	10.5	0.5195	1.30
5.45	50	48	2	10.2	0.5195	1.40
6.77	52	51	1	10.1	0.5195	1.40
7.65	54	52	2	10	0.5195	1.40
8.58	54	52	2	10	0.5195	1.40
9.57	59	57	2	10	0.5195	1.40
10.38	59	57	2	10	0.5195	1.40
11.97	59	58	1	10	0.5195	1.40
15.08	59	58	1	10	0.5195	1.40
17.621	59	58	1	10	0.5195	1.40
22.90	59	58	1	10	0.5195	1.40
26.83	59	58	1	9	0.5195	1.40
28.50	59	58	1	8	0.5195	1.40
29.85	60	59	1	7	0.5195	1.40
30.77	61	60	1	6	0.5195	1.40
31.37	61	60	1	5	0.5195	1.40
32.18	61	60	1	4	0.5195	1.40

บรรณานุกรม

[1] Buchner, H., "Energiespeicherung in Metallhydriden", Springer-Verlag Wien New York, 1982.

[2] Fischer, L., "Hydrogen Storage Devices Using Metal Hydrides",GFE Metalle and Materialien GmbH, Nurnberg, 1999.

[3] Petkov, T., Voziroglu T.N. and Sheffield J.W. (1989), "An Outlook of Hydrogen as an Automotive Fuel", int.J.Hydrogen Energy vol.14, No.7, P.449-474

[4] Smith, W.F., "Principle of Materials Science and Engineering", McGrew-Hill, Inc., New York, 1996.

[5] Ovonic Hydrogen Technology, "Metal Hydrides", http://www.ovonic.com/hydrogen/hydrides.html.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย