บทที่ 6

การทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน แบบเมทัลไฮไดรด์

ภายหลังจากติดตั้งระบบเชื้อเพลิงไฮโดรเจนแบบเมทัลไฮไดรด์กับเครื่องยนต์ แทนที่ถังไฮโดรเจนความดันสูง และอุปกรณ์เครื่องมือวัดต่างๆ ปรับแต่งเครื่องยนต์ไฮโดรเจนให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์

สำหรับเครื่องยนต์ไฮโดรเจน มีอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำในระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์ (ดังรูปที่ 6.1) ประกอบด้วย

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

สำหรับเครื่องยนต์ไฮโดรเจน มีอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบหาสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์สำหรับการเก็บและปล่อยก๊าซไฮโดรเจน (ดังรูปที่ 6.2) 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

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำ (Water flow meter)

อุปกรณ์วัดปริมาณของน้ำที่ไหลผ่านหม้อน้ำในเครื่องยนต์ และวัดปริมาณของน้ำที่ไหลผ่านระบบระบายความร้อน (ดังรูปที่ 6.3 และ 6.4)

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ (Gas flow meter)

อุปกรณ์วัดปริมาณของไฮโดรเจนที่ใช้ในเครื่องยนต์ (ดังรูปที่ 6.5 และ 6.6) เป็นแบบ Variable area flow meter ของบริษัท Fischer & Porter รุ่น 10A 3225CA2AOA1 เพื่อให้การวัดเป็นไปอย่างถูกต้อง จึงจำเป็นต้องทำการ Calibrated gas flow meter และผลการ Calibrated ในรูปที่ ฉ-1 และ ฉ-2 และของบริษัท Elster รุ่น RVG G16 1998 ทนความดันได้ 16 bar

เครื่องวัดอุณหภูมิขาเข้าขาออกจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์

วัดอุณหภูมิของขาเข้า-ออกจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ (ดังรูปที่ 6.7) ของบริษัท YUGO และ Hewlett Packard โดยต่อเข้ากับเทอร์โมคัปเปิล Type K

Osciloscope

อุปกรณ์วัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ของ Tektronix TDS 210 Frequency Range 45-440 Hz ผลิตโดยบริษัท Tektronix Inc. Beaverton

การทดสอบกับระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์

วิธีทดสอบ

การทดสอบเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์ โดยวัดค่าอุณหภูมิขาเข้า-ออกหม้อน้ำ ที่รอบเครื่องยนต์ 1,200 รอบต่อนาที ขณะเครื่องยนต์เดินเบา วัดค่าดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าหม้อน้ำ

2. อุณหภูมิของน้ำหลังออกจากหม้อน้ำ
3. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์
4. อัตราการไหลของน้ำในระบบระบายความร้อน
5. เวลาที่เครื่องยนต์ใช้ก๊าซไฮโดรเจน

บันทึกค่าต่างๆ เพื่อหาค่าอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์ จากนั้นเปลี่ยนรอบเครื่องยนต์เป็น 1,700 รอบต่อนาที, 2,000 รอบต่อนาทีและ 2,500 รอบต่อนาที บันทึกค่าต่างๆ ข้างต้นที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ต่างๆ เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์กับเวลาที่ใช้ในการเดินเครื่องยนต์

การทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจน

วิธีทดสอบ

ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ ให้เท่ากับอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์ให้คงที่ ควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์เท่ากับ 32 องศาเซลเซียส (ที่อุณหภูมิห้อง) ทดสอบขณะเครื่องเดินเบาที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1,200 รอบต่อนาที, 1,700 รอบต่อนาที, 2,000 รอบต่อนาที และ 2,500 รอบต่อนาที ตามลำดับ บันทึกค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
2. อุณหภูมิของน้ำหลังออกจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
3. ความดันก๊าซไฮโดรเจนออกจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
4. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์
5. อุณหภูมิบรรยากาศ
6. อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
7. อัตราการไหลของไฮโดรเจน
8. เวลาที่เครื่องยนต์ใช้ไฮโดรเจนจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์

หลังจากบันทึกค่าต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ทำการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยเปลี่ยนความเร็วรอบของเครื่องยนต์เป็น 1,700 รอบต่อนาที, 2,000 รอบต่อนาที และ 2,500 รอบ

ต่อนาที ตามลำดับ และบันทึกค่าต่างๆ ข้างต้นเช่นเดียวกัน จากนั้นเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์เพิ่มเป็น 50 องศาเซลเซียส และ 70 องศาเซลเซียส และเดินเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ ต่างๆ ทำการบันทึกค่า

การทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ขณะบรรจุก๊าซไฮโดรเจน

วิธีทดสอบ

1. ควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ ให้เท่ากับอุณหภูมิน้ำเท่ากับ 32 องศาเซลเซียส (ที่อุณหภูมิห้อง) ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเท่ากับอัตราการไหลของน้ำในหม้อน้ำ วัดค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
2. อุณหภูมิของน้ำหลังจากออกถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
3. ความดันก๊าซไฮโดรเจนภายในถังเก็บไฮโดรเจนความดันสูง
4. อุณหภูมิบรรยากาศ
5. อัตราการไหลของน้ำ
6. เวลาที่เครื่องยนต์ใช้ไฮโดรเจนจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์

บันทึกค่าต่างๆ ดังกล่าว ทำการทดสอบโดยเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของน้ำเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์เป็น 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง, 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และ 3.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

2. กรณีเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์เป็น 50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการไหลของน้ำเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์เท่ากับ 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ทำการบันทึกค่าต่างๆ ข้างต้น

3. กรณีหาผลของ Heat Capacity ของถังเมทัลไฮไดรด์ ขณะบรรจุก๊าซเข้าถังเก็บอุณหภูมิสูงเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ปล่อยให้น้ำที่อุณหภูมิ 32 องศเซลเซียสเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ไหลด้วยอัตราการไหลของน้ำเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์เท่ากับ 3.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ทำการบันทึกค่าต่างๆ เช่นเดียวกัน

การทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจน เมื่อถังได้รับความร้อนจากน้ำร้อนหม้อน้ำในเครื่องยนต์

วิธีทดสอบ

ภายหลังจากการติดตั้งถังเมทัลไฮไดรด์เข้ากับเครื่องยนต์แล้ว ดังรูปที่ 6.11 ทดสอบขณะเครื่องยนต์เดินเบา ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1,200 รอบต่อนาที บันทึกค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
2. อุณหภูมิของน้ำหลังออกจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
3. ความดันก๊าซไฮโดรเจนออกจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์
4. ความเร็วรอบของเครื่องยนต์
5. อุณหภูมิบรรยากาศ
6. อัตราการไหลของน้ำ
7. อัตราการไหลของไฮโดรเจน
8. เวลาที่เครื่องยนต์ใช้ไฮโดรเจนจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์

หลังจากบันทึกค่าต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ทำการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยเปลี่ยนความเร็วรอบของเครื่องยนต์เป็น 1,700 รอบต่อนาที, 2,000 รอบต่อนาที และ 2,500 รอบต่อนาที ตามลำดับ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์

สำหรับผลการทดสอบหาอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นในเครื่องยนต์ แสดงในตาราง ก-1 ถึง ก-4 ที่ความเร็วรอบต่างๆ สำหรับข้อมูลต่างๆ ที่อยู่ในตาราง ก-1 ถึง ก-4 สามารถเปรียบเทียบหาอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นในเครื่องยนต์ และอุณหภูมิขาเข้า-ออกจากหม้อน้ำด้วยกราฟรูปที่ 6.12 ถึงรูปที่ 6.15

สำหรับผลการทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ สำหรับการปล่อยไฮโดรเจนจะแสดงในตาราง ก-5 ถึง ก-13 และผลการทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ สำหรับการเก็บไฮโดรเจนจะแสดงในตาราง ก-14 ถึง 19 ข้อมูลต่างๆ ที่อยู่ในตาราง ก-5 ถึง ก-13 สามารถ

เปรียบเทียบผลการทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ สำหรับการปล่อยด้วยกราฟรูปที่ 6.16 ถึงรูปที่ 6.19 และข้อมูลต่างๆ ที่อยู่ในตาราง ก-14 ถึง ก-18 สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ สำหรับการบรรจุไฮโดรเจนเข้าถังเก็บด้วยกราฟรูปที่ 6.19 ถึงรูปที่ 6.21

สำหรับผลการทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ สำหรับการปล่อยไฮโดรเจนเมื่อถังได้รับน้ำร้อนจากหม้อน้ำในเครื่องยนต์ จะแสดงในตาราง ก-20 ถึง ก-23 สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ สำหรับการปล่อยด้วยกราฟรูปที่ 6.22 ถึงรูปที่ 6.25

ทดสอบหาอัตราการไหลของน้ำในระบบหล่อเย็นในเครื่องยนต์

พิจารณารูปที่ 6.12, 6.13, 6.14 และรูปที่ 6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำเข้า-ออกจากหม้อน้ำเทียบกับเวลา อัตราการไหลของน้ำผ่านหม้อน้ำ และปริมาณความร้อนออกจากหม้อน้ำเทียบกับเวลา พบว่า ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์สูง อัตราการไหลของน้ำผ่านหม้อน้ำสูงตามด้วย หม้อน้ำสามารถระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์ได้เท่ากับ 7.58-17.97 kJ/s ดังแสดงในตารางที่ ก-1 ถึง ก-4 จากกราฟที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,200 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ออกจากเครื่องยนต์ก่อนเข้าหม้อน้ำเท่ากับ 65 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิออกจากหม้อน้ำท่ากับ 58 องศาเซลเซียส หม้อน้ำสามารถระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์ 7 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 1.35 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ในขณะที่เพิ่มความเร็วรอบเครื่องยนต์เป็น 1,700 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ออกจากเครื่องยนต์ก่อนเข้าหม้อน้ำเท่ากับ 73 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิออกจากหม้อน้ำท่ากับ 62 องศาเซลเซียส หม้อน้ำสามารถลดอุณหภูมิได้ถึง 11 องศาเซลเซียส มีอัตราการไหลเท่ากับ 1.40 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์เป็น 2,000 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ออกจากเครื่องยนต์ก่อนเข้าหม้อน้ำเท่ากับ 72 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิออกจากหม้อน้ำท่ากับ 61 องศาเซลเซียส หม้อน้ำสามารถลดอุณหภูมิได้ถึง 11 องศาเซลเซียส มีอัตราการไหลเท่ากับ 1.40 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์เป็น 2,500 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ออกจากเครื่องยนต์ก่อนเข้าหม้อน้ำเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิออกจากหม้อน้ำท่ากับ 61 องศาเซลเซียส หม้อน้ำสามารถลดอุณหภูมิได้ถึง 9 องศาเซลเซียส มีอัตราการไหลเท่ากับ 1.40 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จะเห็นว่าอัตราการไหลของน้ำในหม้อน้ำมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบของการเดินเครื่องยนต์ โดยที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์สูง อัตราการไหลของน้ำในหม้อน้ำก็จะสูงตาม

ด้วย ซึ่งการทำวิจัยนี้ จะกำหนดค่าอัตราการไหลของระบบน้ำไหลผ่านถังเมทัลไฮไดรด์ สำหรับการนำก๊าซไฮโดรเจนมาใช้จากถังเมทัลไฮไดรด์ไว้ที่ 1.40 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

สมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ สำหรับการปล่อยไฮโดรเจน

เปรียบเทียบโดยเปลี่ยนอัตราการจ่ายของไฮโดรเจน

พิจารณารูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับเวลาที่ใช้ในการสันดาปเครื่องยนต์ ขณะเครื่องยนต์เดินเบา ที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์เท่ากับ 32 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่างๆ พบว่า ที่ความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที มีอัตราการจ่ายของไฮโดรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 0.1203 ลิตรของก๊าซไฮโดรเจนที่ความดัน 5 บาร์ต่อวินาที กราฟช่วงแรกบอกได้ว่า ความดันของก๊าซไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ 26 บาร์ จะลดลงอย่างรวดเร็ว ภายใน 1 นาที นั่นคือความดันของก๊าซที่อยู่อิสระภายในถังเมทัลไฮไดรด์ ต่อมาความดันที่ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ลดลงเหลือ 20 บาร์ จนความดันถึงระดับ 6 บาร์ ช่วงนี้จะใช้เวลานานจนกว่าความดันจะตกลงมาที่ 5 บาร์ ที่ความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที จะใช้เวลา 31 นาที 45 วินาที ความดันจึงลดลงเท่ากับ 4 บาร์ สาเหตุที่ตั้งไว้ว่าความดันของก๊าซไฮโดรเจนออกจากถังเมทัลไฮไดรด์ 4 บาร์ ถือว่าเป็นจุดสิ้นสุดการวัดค่าต่างๆ เพื่อให้เหลือระดับความดันก๊าซเพียงพอสำหรับการไล่อากาศออกจากถังเมทัลไฮไดรด์ในการบรรจุก๊าซไฮโดรเจนเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์

ที่ความเร็ว 1,700 รอบต่อนาที มีอัตราการจ่ายของไฮโดรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 0.1328 ลิตรต่อวินาที ความดันเริ่มต้นที่ 24 บาร์ จะลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 1 นาที ความดันที่ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ลดลงเหลือ 16 บาร์ จนความดันถึงระดับ 6-8 บาร์ ช่วงนี้จะใช้เวลานานจนกว่าความดันจะตกลงมาที่ 5 บาร์ ที่ความเร็วรอบ 1,700 รอบต่อนาที จะใช้เวลา 15 นาที 25 วินาที ความดันจึงลดลงเท่ากับ 4 บาร์ ที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที มีอัตราการจ่ายของไฮโดรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 0.1453 ลิตรต่อวินาที ความดันเริ่มต้นที่ 27 บาร์ จะลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 1 นาที ความดันที่ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ลดลงเหลือ 18 บาร์ จนความดันถึงระดับ 5-6 บาร์ ช่วงนี้จะใช้เวลานานจนกว่าความดันจะตกลงมาที่ 4 บาร์ ที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที จะใช้เวลา 17 นาที 30 วินาที ความดันจึงลดลงเท่ากับ 4 บาร์ แต่ที่ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที มีอัตราการจ่ายของไฮโดรเจนเฉลี่ยเท่ากับ 0.1703 ลิตรต่อวินาที ความดันเริ่มต้นที่ 26 บาร์ จะลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 1 นาที ความดันที่ถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ลดลงเหลือ 18 บาร์ จนความดันถึงระดับ 5-6 บาร์ ช่วงนี้จะใช้เวลานานจนกว่าความดันจะตก

ลงมาที่ 4 บาร์ ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที ความดันของก๊าซไฮโดรเจนลดลงเท่ากับ 4 บาร์ จะใช้เวลา 17 นาที 5 วินาที

จากรูปที่ 6.16 แสดงสภาวะการทำงานของเมทัลไฮไดรด์ ซึ่งสามารถบอกถึงความดันราบของเมทัลไฮไดรด์ได้ โดยสังเกตช่วงที่ความดันลดลงถึงค่าๆหนึ่ง โดยก๊าซไฮโดรเจนจะถูกปล่อยออกมาเป็นเวลานาน เรียกว่า ความดันราบ (plateau pressure) ของเมทัลไฮไดรด์ที่อุณหภูมินั้น จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 องศาเซลเซียส จะมีความดันราบที่ 6 บาร์ ที่ความเร็วรอบสูงเวลาที่ใช้ในการเดินเครื่องจะลดต่ำลง เนื่องจากอัตราการจ่ายไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนออกจากเมทัลไฮไดรด์ อุณหภูมิน้ำออกจากถังเมทัลไฮไดรด์จะลดลง ΔT = 1 องศาเซลเซียส ถังเมทัลไฮไดรด์สามารถระบายความร้อนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.63 kJ/s และความร้อนที่ได้จากการจ่ายไฮโดรเจนประมาณ 20.81 kJ/mol H_2 เนื่องจากการทำให้ก๊าซไฮโดรเจนขับออกจากเมทัลไฮไดรด์ต้องใช้พลังงานช่วยในการเกิดปฏิกิริยา ความร้อนที่ได้มาจากสิ่งแวดล้อมและจากน้ำในระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์

พิจารณารูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันของก๊าซไฮโดรเจนกับเวลาที่ใช้ในการสันดาปเครื่องยนต์ ขณะเครื่องยนต์เดินเบา ที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 50 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่างๆ พบว่า ที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการปล่อยก๊าซไฮโดรเจนของเมทัลไฮไดร์ดเพิ่มขึ้น พบว่า ที่ความเร็วรอบ 1,200 รอบต่อนาที จะใช้เวลา 80 นาที 16 วินาที ที่ความเร็วรอบ 1,700 รอบต่อนาที จะใช้เวลา 62 นาที 15 วินาที ที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที จะใช้เวลา 54 นาที 43 วินาที และที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที จะใช้เวลา 35 นาที 6 วินาที นั่นคือ ที่ความเร็วรอบสูงเวลาที่ใช้ในการเดินเครื่องจะลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการจ่ายไฮโดรเจน ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนออกจากเมทัลไฮไดรด์ อุณหภูมิของน้ำออกจากถังเมทัลไฮไดรด์จะลดลง ΔT = 1-2 องศาเซลเซียส ถังเมทัลไฮไดรด์สามารถระบายความร้อนได้ถึง 1.91 kJ/s และความร้อนที่ได้จากการจ่ายไฮโดรเจนประมาณ 25.51 kJ/mol H_2

จากรูปที่ 6.17 แสดงสภาวะการทำงานของเมทัลไฮไดรด์ ซึ่งสามารถบอกถึงความดันราบของเมทัลไฮไดรด์ได้ ขณะจ่ายก๊าซไฮโดรเจน จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 50 องศาเซลเซียส จะมีความดันราบที่ 8 บาร์

เปรียบเทียบโดยเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์

พิจารณารูปที่ 6.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันของก๊าซไฮโดรเจนออกจากถังเมทัลไฮไดรด์กับเวลาที่ใช้ในการสันดาปเครื่องยนต์ ขณะเครื่องยนต์เดินเบา ควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 2,500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์เท่ากับ 32, 50 และ 70 องศาเซลเซียส จะได้ว่า ที่อุณหภูมิน้ำของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์สูง ความดันราบของเมทัลไฮไดรด์สูงด้วย โดยที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 องศาเซลเซียส มีความดันราบที่ช่วง 6 บาร์ ที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 50 องศาเซลเซียส มีความดันราบที่ช่วง 8 บาร์ และที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 70 องศาเซลเซียส มีความดันราบที่ช่วง 12-16 บาร์ อีกทั้งที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์สูง ทำให้สามารถไล่ก๊าซไฮโดรเจนออกจากเมทัลไฮไดรด์ได้สูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ โดยที่อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 32 องศาเซลเซียส สามารถขับก๊าซไฮโดรเจนออกจากเมทัลไฮไดรด์ปริมาณ 1,047 ลิตรมาตรฐาน ที่ความดันบรรยากาศ สำหรับอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 50 องศาเซลเซียส สามารถขับก๊าซไฮโดรเจนออกจากเมทัลไฮไดรด์ปริมาณ 3,004 ลิตรมาตรฐาน และที่อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 70 องศาเซลเซียส สามารถไล่ก๊าซไฮโดรเจนออกจากเมทัลไฮไดรด์ปริมาณ 4,169 ลิตรมาตรฐาน นั่นคือ สามารถสรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่านถังเมทัลไฮไดรด์สูง เมทัลไฮไดรด์จะไล่ก๊าซไฮโดรเจนออกมาในปริมาณสูงด้วย

สมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ สำหรับการบรรจุไฮโดรเจน

เปรียบเทียบโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์

พิจารณารูปที่ 6.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่บรรจุเข้าถังเมทัลไฮไดรด์เทียบกับเวลา พบว่า เมื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ให้คงที่เท่ากับ 32 องศาเซลเซียส เปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ พบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 1.4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาบรรจุ 15 นาที 33 วินาที มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในถังเมทัลไฮไดรด์มีอยู่ประมาณ 2,800 ลิตรมาตรฐาน การตรวจสอบว่าการเติมก๊าซไฮโดรเจนจนเต็ม สังเกตได้จากผลต่างของอุณหภูมิที่ เมื่อใกล้เต็มผลต่างของอุณหภูมิจะเท่ากับศูนย์ ที่อัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาบรรจุ 13 นาที 56 วินาที ที่อัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 2.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลา 11 นาที ที่อัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 3.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาบรรจุ 10 นาที 30 วินาที นั่นคือ สามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ทำ

ให้ใช้เวลาน้อยลงในการบรรจุไฮโดรเจนลงถังเมทัลไฮไดรด์ โดยค่าความร้อนที่ได้จากการบรรจุไฮโดรเจนมีค่าประมาณ 23.64 kJ/mol H_2

เปรียบเทียบโดยเปลี่ยนอุณหภูมิของถังเมทัลไฮไดรด์

พิจารณารูปที่ 6.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่บรรจุเข้าถังเมทัลไฮไดรด์เทียบกับเวลาที่บรรจุภายในถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ ด้วยอัตราการไหลของน้ำเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 3.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เปลี่ยนอุณหภูมิถังเมทัลไฮไดรด์ที่อุณหภูมิ 32 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่า ถังเมทัลไฮไดรด์ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส ใช้เวลาบรรจุ 10 นาที 30 วินาที แต่ถังเมทัลไฮไดรด์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาบรรจุ 29 นาที 34 วินาที เนื่องจากความร้อนของถังเมทัลไฮไดรด์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ไม่สามารถระบายความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งทำให้การเติมก๊าซไฮโดรเจนทันทีขณะอุณหภูมิของถังมีอุณหภูมิสูง จะใช้เวลาในการบรรจุมาก ดังนั้น ควรเติมไฮโดรเจนขณะถังเมทัลไฮไดรด์ มีอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำ

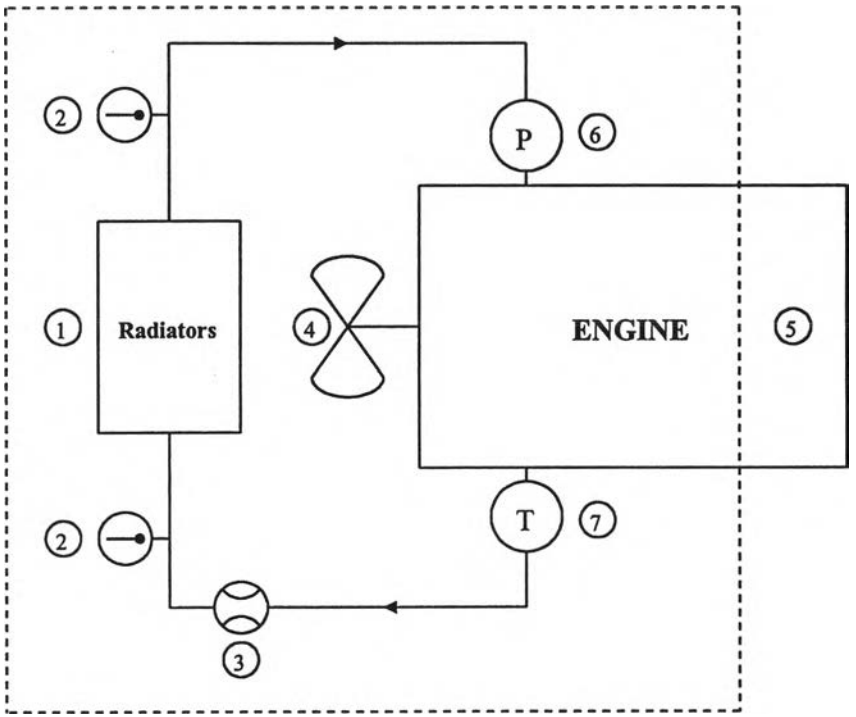
เปรียบเทียบโดยเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำเข้าถังเมทัลไฮไดรด์

พิจารณารูปที่ 6.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่บรรจุเข้าถังเมทัลไฮไดรด์เทียบกับเวลาที่บรรจุภายในถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ ด้วยอัตราการไหลของน้ำเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำเข้าถังเมทัลไฮไดรด์เท่ากับ 32 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่า อุณหภูมิของน้ำเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 32 องศาเซลเซียส ใช้เวลาบรรจุ 13 นาที 5 วินาที แต่ที่อุณหภูมิของน้ำเข้าถังเมทัลไฮไดรด์ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาบรรจุ 29 นาที 34 วินาที นั่นคือ อุณหภูมิของน้ำเข้าถังเมทัลไฮไดรด์สูง จะทำให้เวลาที่ใช้ในการบรรจุก๊าซไฮโดรเจนลงในถังเมทัลไฮไดรด์จะนานขึ้น

สมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจน เมื่อถังได้รับความร้อนจากน้ำร้อนหม้อน้ำในเครื่องยนต์

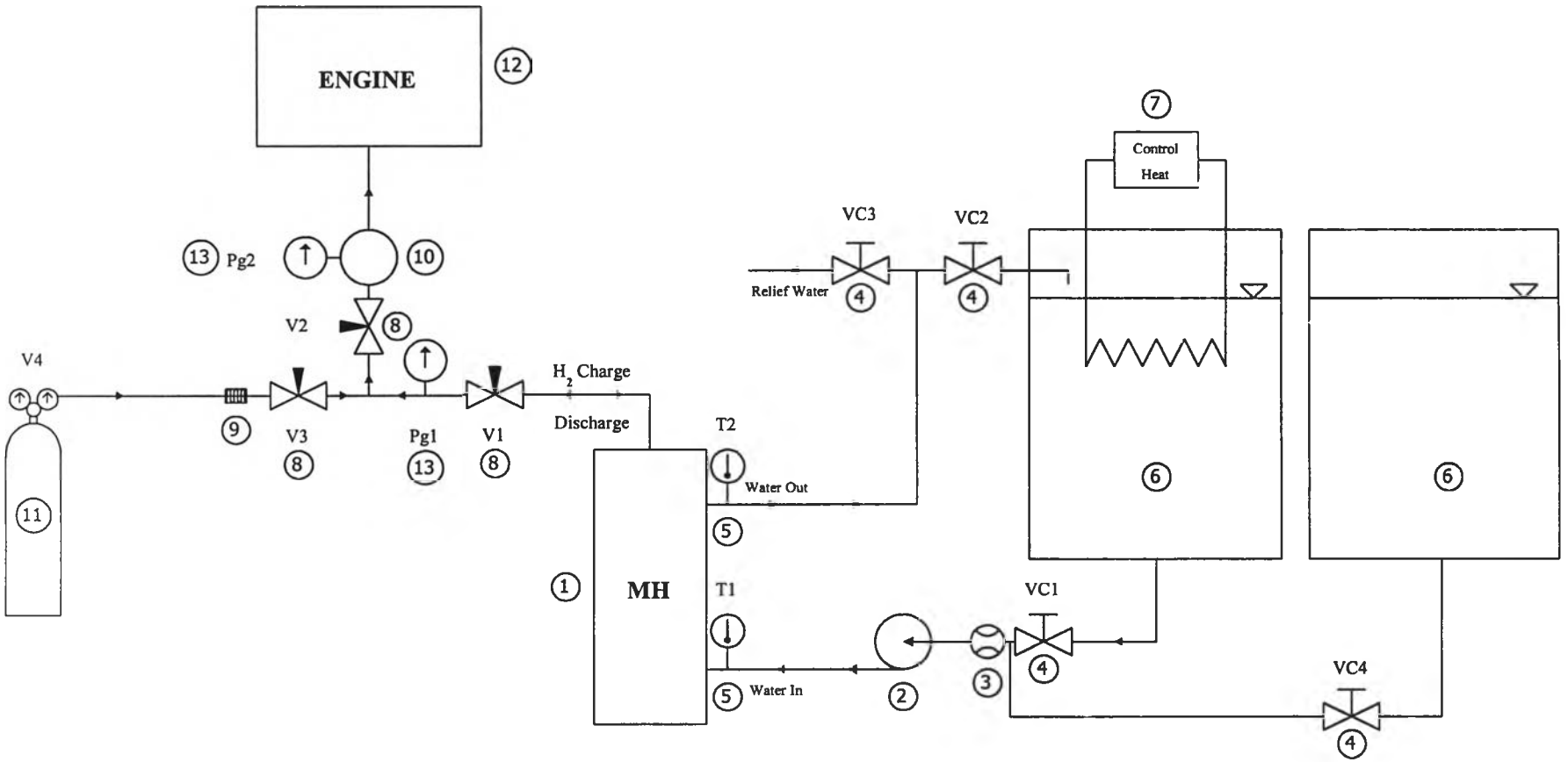
พิจารณารูปที่ 6.22, 6.23, 6.24 และรูปที่ 6.25 แสดงสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจน เมื่อถังได้รับความร้อนจากน้ำร้อนหม้อน้ำในเครื่องยนต์เทียบกับเวลาที่นำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ขณะเครื่องเดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที พบว่า ความดันของถังเม

ทัลไฮไดรด์จะลดลงอย่างรวดเร็วภายในนาทีแรก นั่นคือ เครื่องยนต์ใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่อยู่ในถังเมทัลไฮไดรด์ แล้วความดันก๊าซไฮโดรเจนลดลงถึง 10 บาร์ ที่ตำแหน่งนี้จะใช้เวลาในการปล่อยก๊าซไฮโดรเจนนาน แสดงว่า มีความดันราบอยู่ที่ 10 บาร์ มีอุณหภูมิความร้อนก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์เท่ากับ 57 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 73 นาที 56 วินาที และ ΔT = 1-2 องศาเซลเซียส ถังเมทัลไฮไดรด์สามารถระบายความร้อนได้ถึง 1.28 kJ/s และความร้อนที่ได้จากการจ่ายไฮโดรเจนประมาณ 26.72 kJ/mol H_2 พิจารณารูปที่ 6.23 สมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนเมื่อถังได้รับความร้อนจากน้ำร้อนหม้อน้ำในเครื่องยนต์เทียบกับเวลาที่นำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ขณะเครื่องเดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที มีความดันราบอยู่ที่ 10 บาร์ มีอุณหภูมิความร้อนก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์เท่ากับ 61 องศาเซลเซียส และ ΔT = 1-3 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 52 นาที 9 วินาที และความร้อนที่ได้จากการจ่ายไฮโดรเจนเท่ากับ 24.00 kJ/mol H_2 พิจารณารูปที่ 6.24 ขณะเครื่องเดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที มีความดันราบอยู่ที่ 10 บาร์ มีอุณหภูมิความร้อนก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์เท่ากับ 61 องศาเซลเซียส และ ΔT = 1-3 องศาเซลเซียสใช้เวลา 41 นาที 45 วินาที และความร้อนที่ได้จากการจ่ายไฮโดรเจน 24.94 kJ/mol H_2 พิจารณารูปที่ 6.25 เวลาที่นำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) จริงบนรถยนต์ทดสอบ ขณะเครื่องเดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที มีความดันราบอยู่ที่ 10 บาร์ มีอุณหภูมิความร้อนก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์เท่ากับ 61 องศาเซลเซียส และ ΔT = 1-3 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 32 นาที 11 วินาที และความร้อนที่ได้จากการจ่ายไฮโดรเจน 25.73 kJ/mol H_2 สามารถนำก๊าซไฮโดรเจนมาใช้ได้ประมาณ 3,202 ลิตรมาตรฐาน



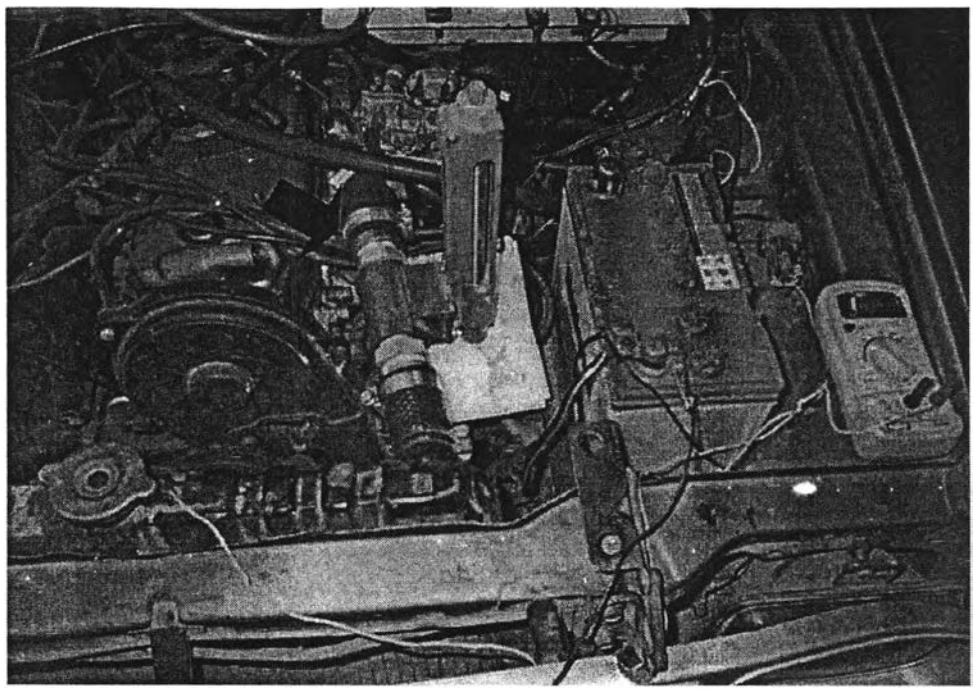
1 Radiators
2 Thermocouple
3 Water flow meter
4 Fan
5 Engine
6 Water pump
7 Thermostat

รูปที่ 6.1 แสดงตำแหน่งการติดเครื่องวัดอุณหภูมิและเครื่องวัดอัตราการไหลสำหรับเครื่องยนต์ไฮโดรเจน

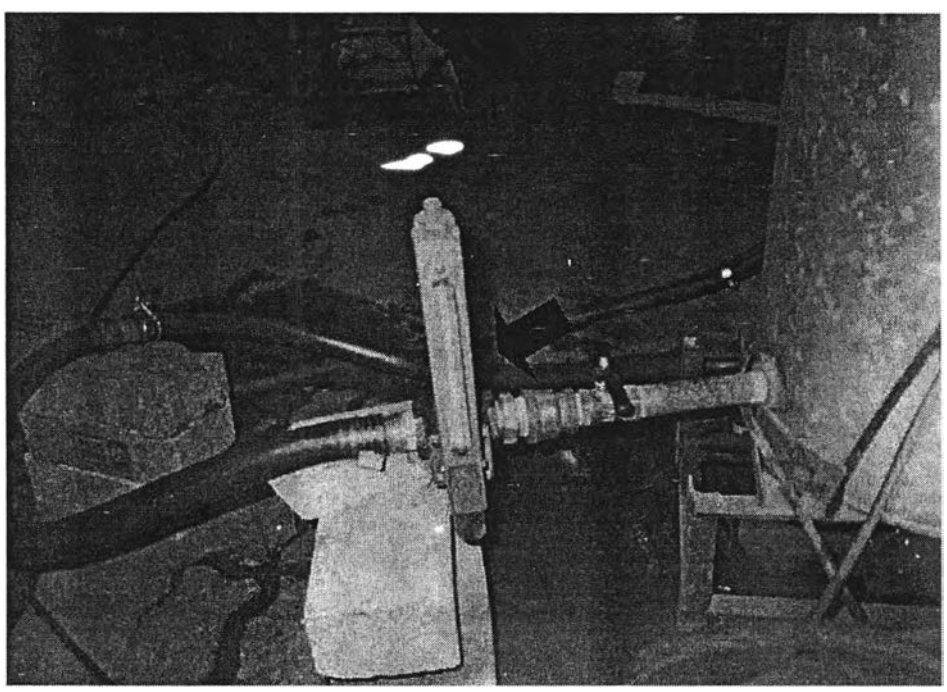


1. Metal Hydride Storage Tank
2. Pump
3. Water Flowmeter
4. Ball Valve
5. Temperature Measurement
6. Water Storage Tank
7. Control Heat System
8. Needle Vavle
9. Quick Connector
10. Regulator
11. Hydrogen High Pressure Tank
12, Engine
13. Pressure Gauge

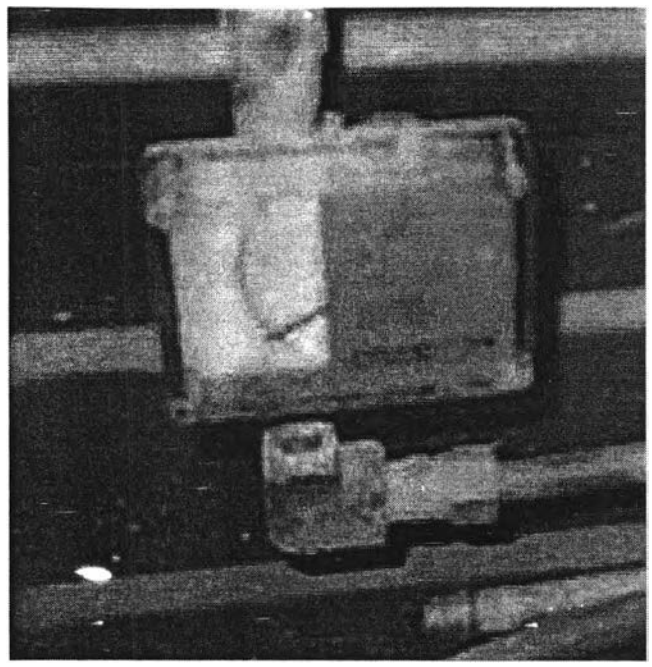
รูปที่ 6.2 แสดงอุปกรณ์ทดสอบหาสมรรถนะของถังเมทัลไฮไดรด์ ทั้งเก็บและปล่อยก๊าซไฮโดรเจน



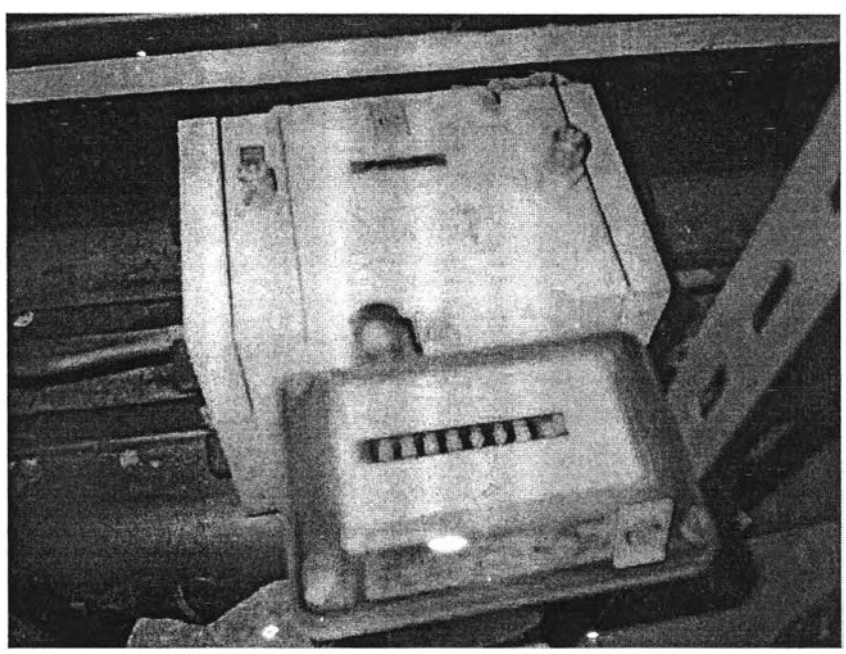
รูปที่ 6.3 แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าหม้อน้ำ ขณะติดตั้งบนเครื่องยนต์



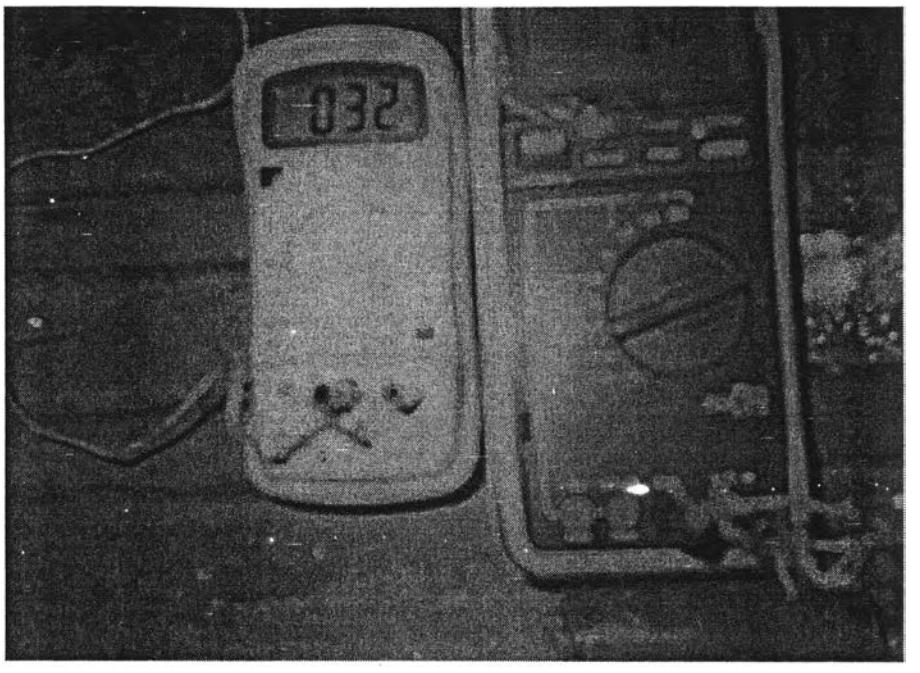
รูปที่ 6.4 แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าถังเมทัลไฮไดรด์



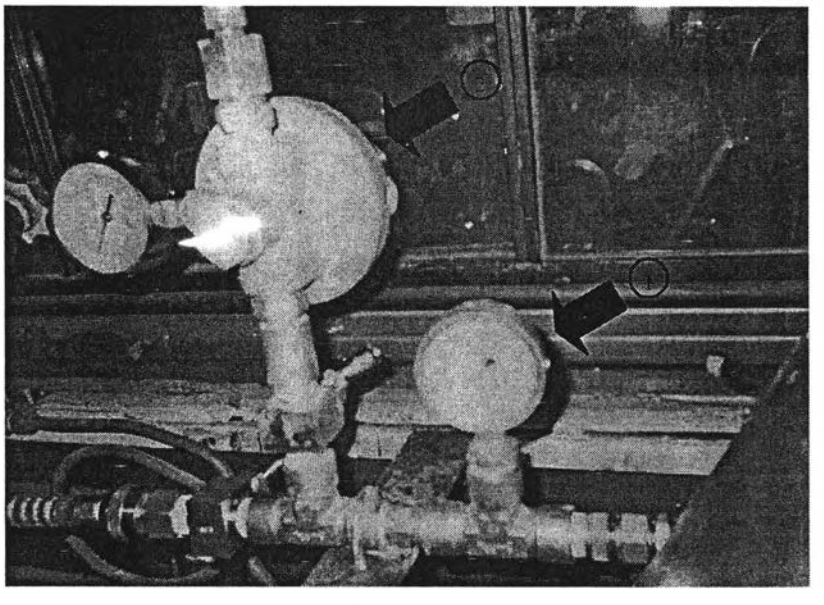
รูปที่ 6.5 แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน



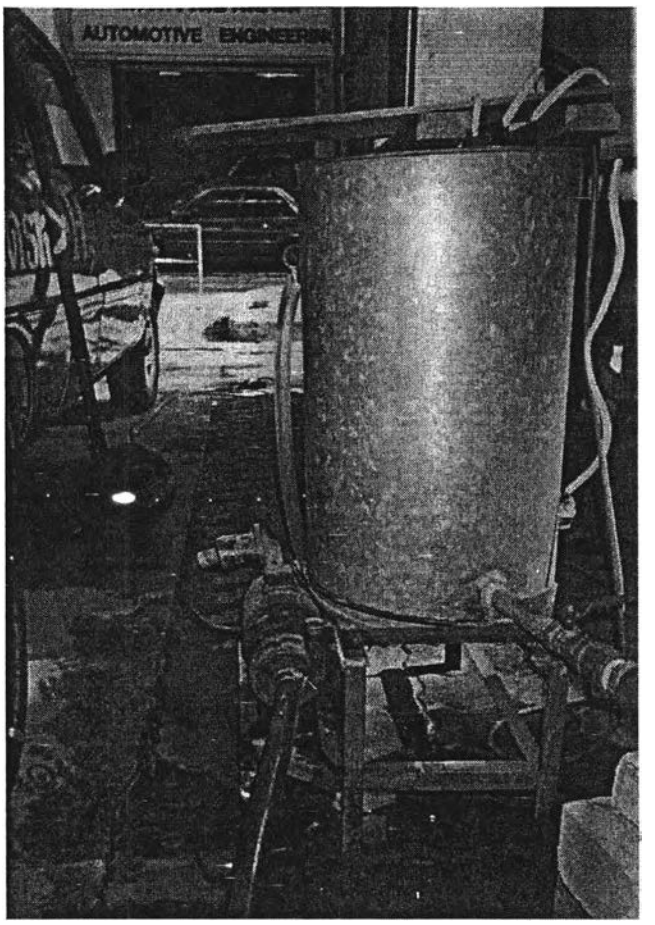
รูปที่ 6.6 แสดงอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซไฮโดรเจน



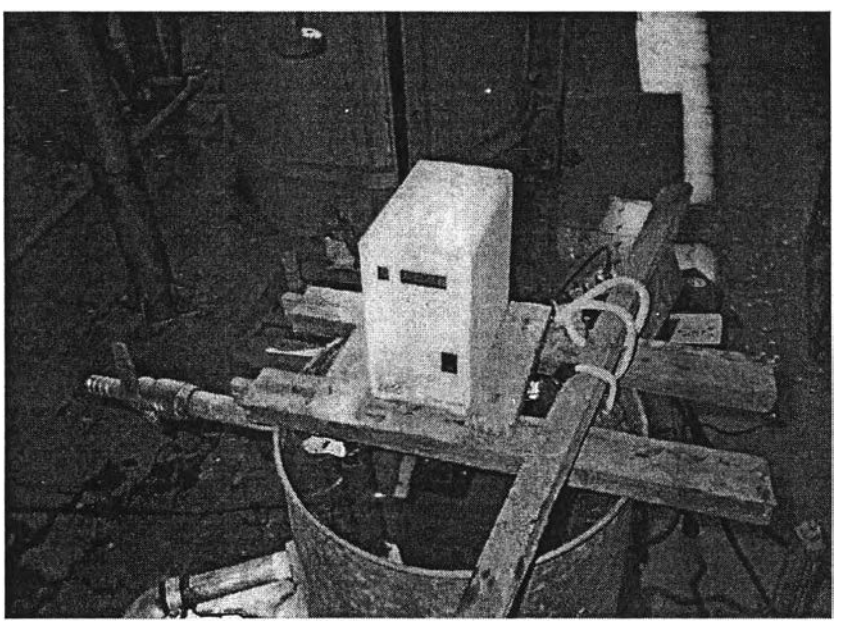
รูปที่ 6.7 แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิขาเข้า-ขาออกจากถังเก็บเมทัลไฮไดรด์



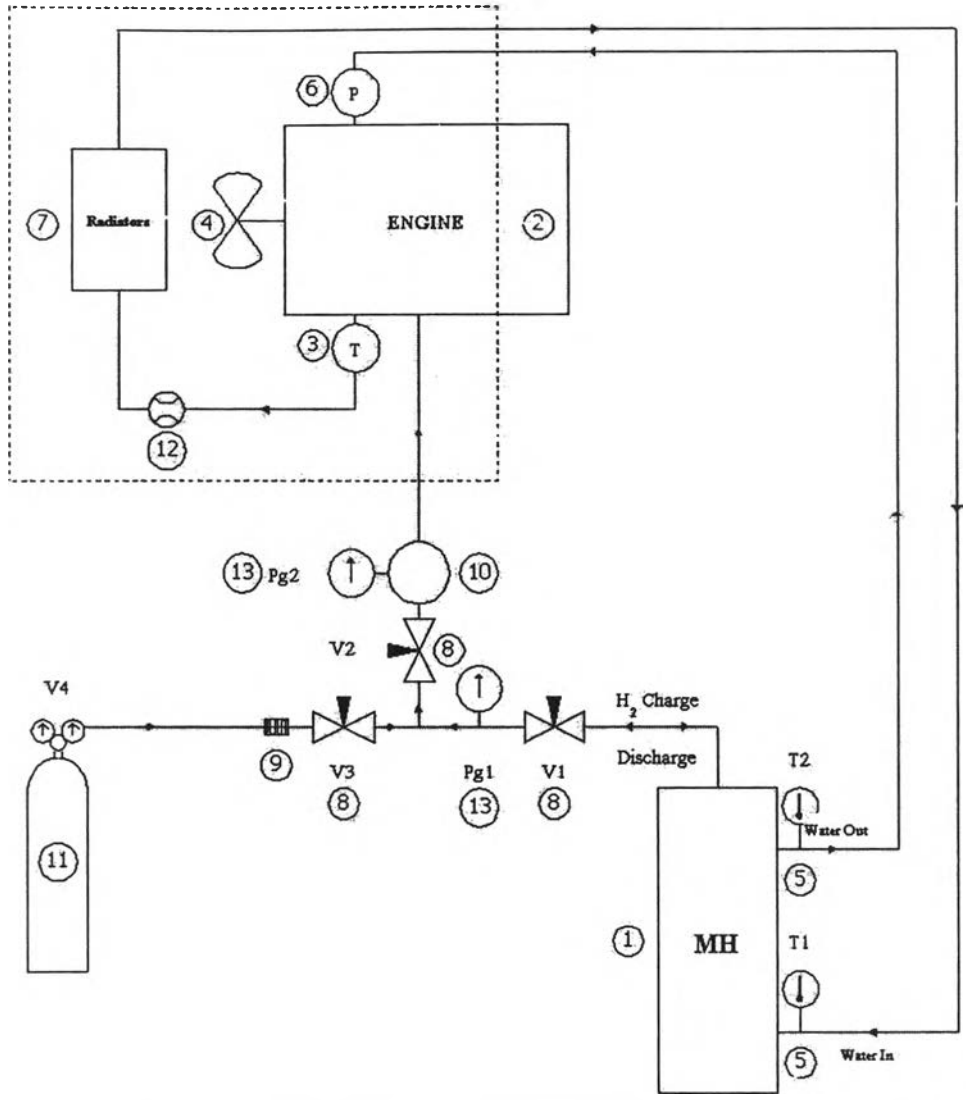
รูปที่ 6.8 แสดง (1) เกจวัดความดันขาออกจากถังเมทัลไฮไดรด์ และ (2) Pressure Regulator



รูปที่ 6.9 แสดงระบบระบายความร้อนของถังเมทัลไฮไดรด์

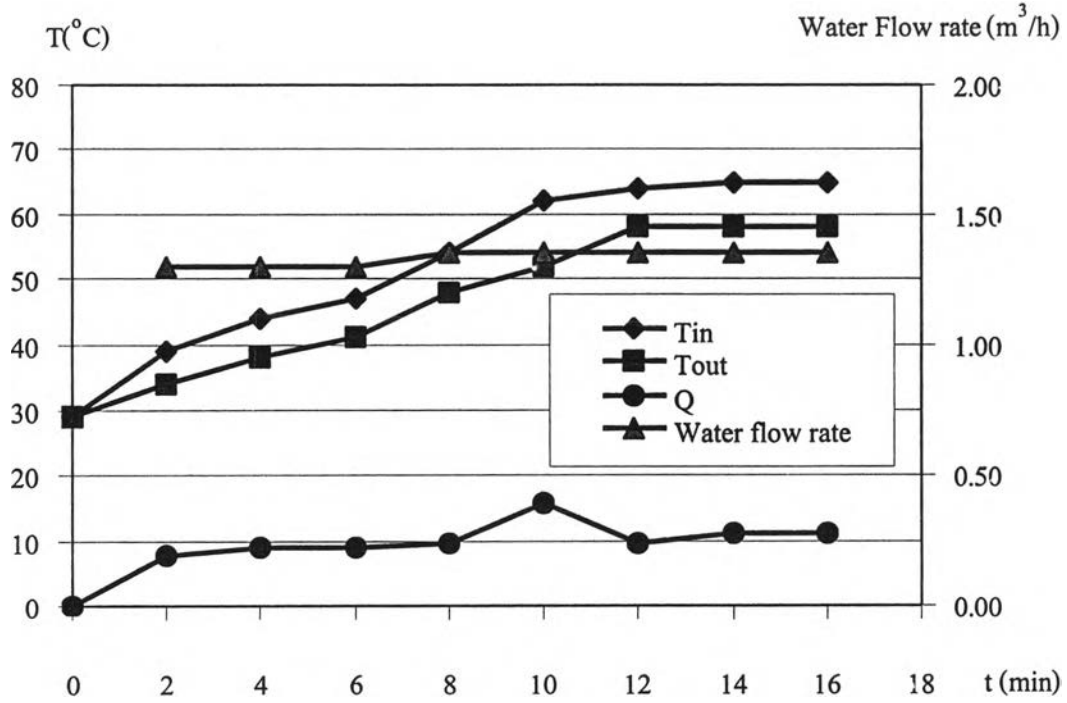


รูปที่ 6.10 แสดงเครื่องควบคุมความร้อน (Control Heat System)

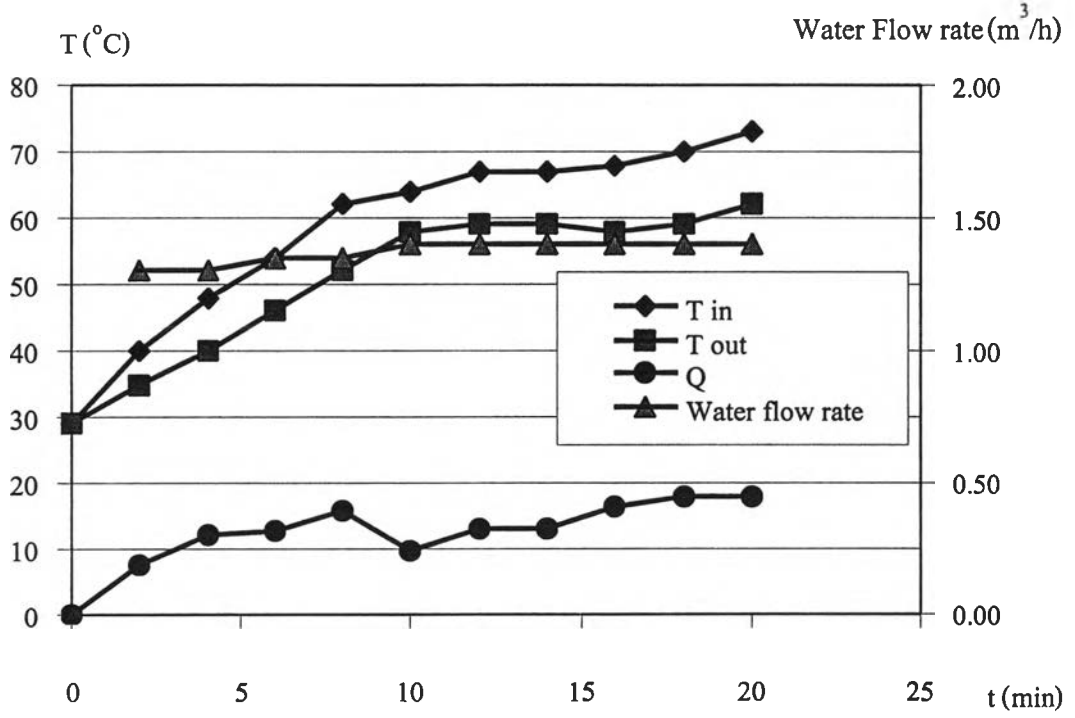


1. Metal Hydride Storage Tank
2. Engine
3. Thermostat
4. Fan
5. Temperature Measurement
6. Pump
7. Radiator
8. Needle Vavle
9. Quick Connector
10. Regulator
11. Hydrogen High Pressure Tank
12. Water flow meter
13. Pressure Gauge

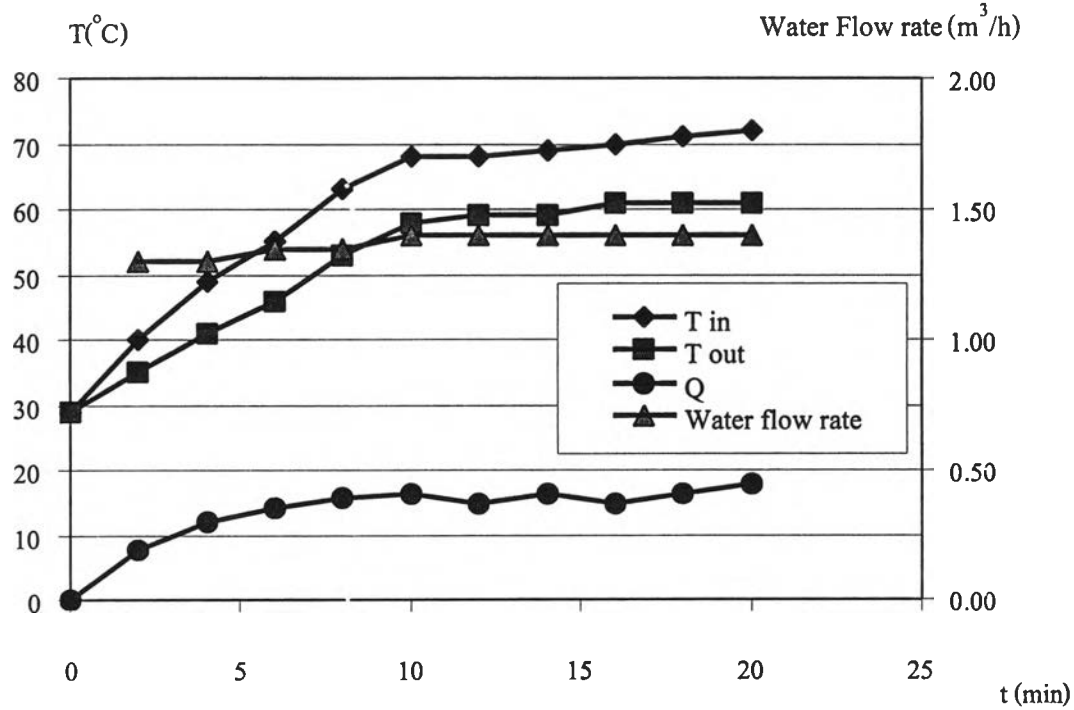
รูปที่ 6.11 แสดงตำแหน่งการติดถังเมทัลไฮไดรด์กับเครื่องยนต์



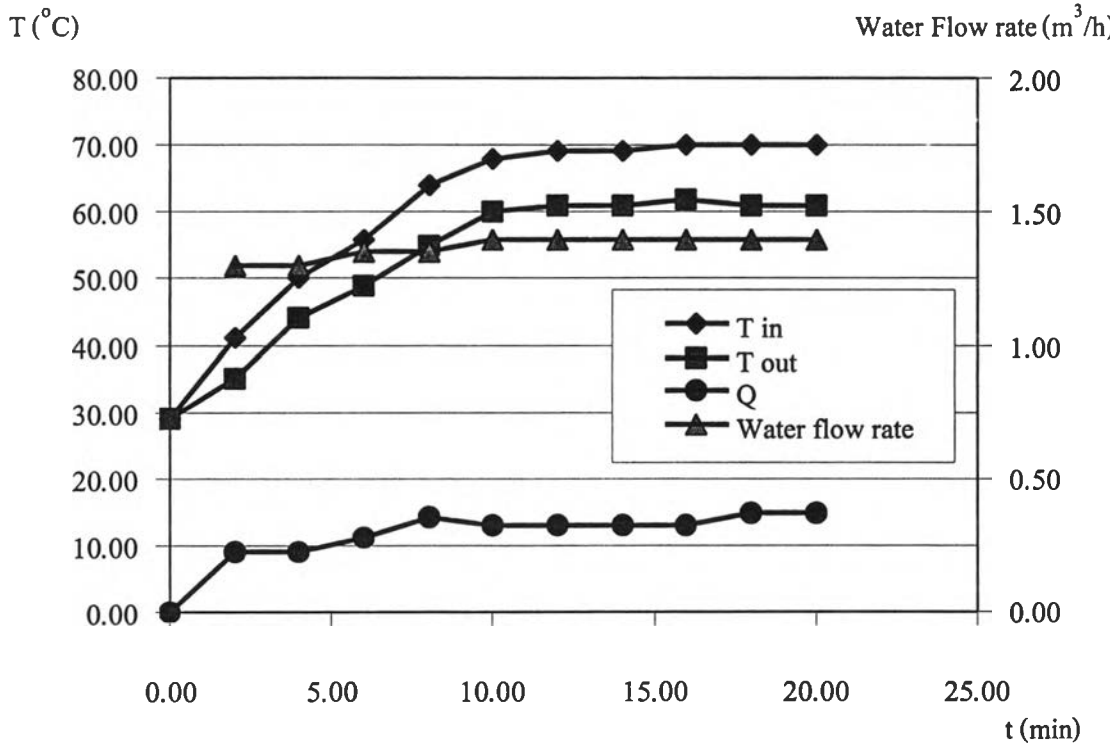
รูปที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์ อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้า-ออก และปริมาณความร้อนที่ระบายออกจากหม้อน้ำกับเวลา ขณะเครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที



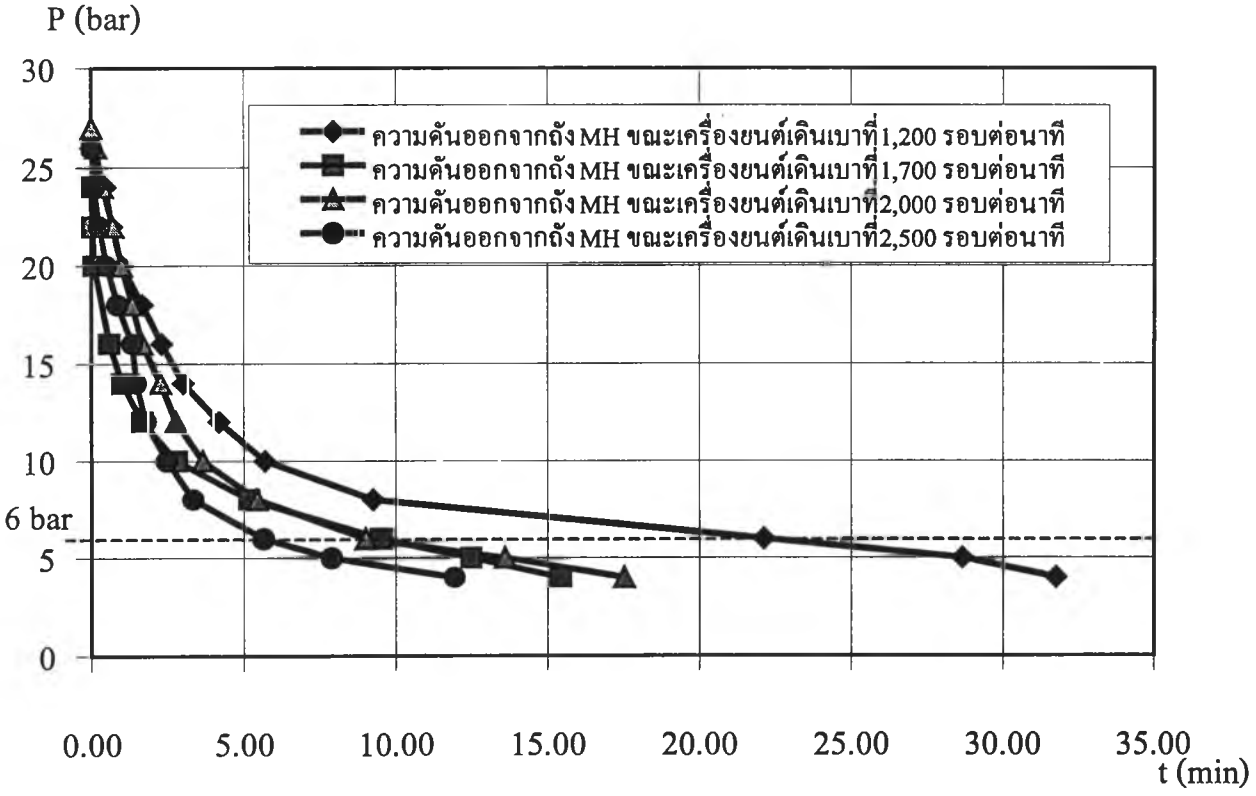
รูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์ อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้า-ออก และปริมาณความร้อนที่ระบายออกจากหม้อน้ำกับเวลา ขณะเครื่องยนต์เดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที



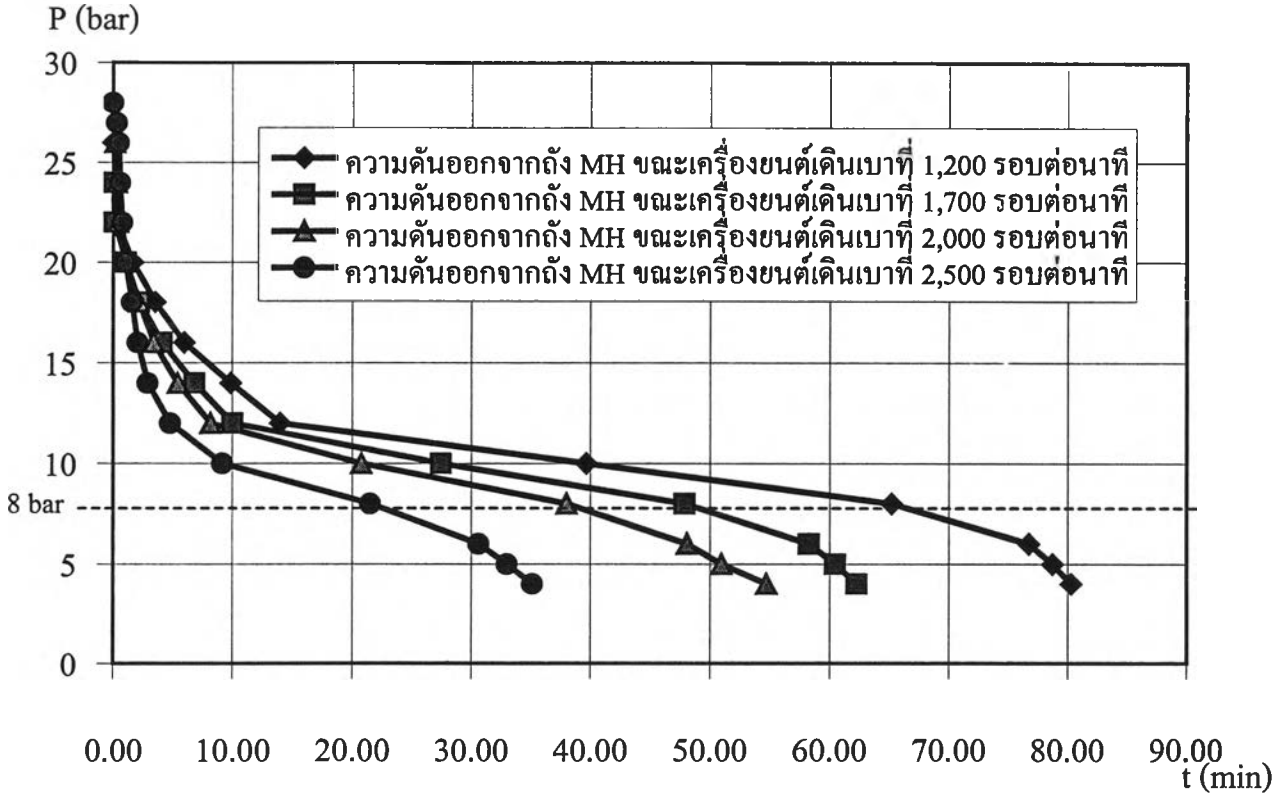
รูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์ อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้า-ออก และปริมาณความร้อนที่ระบายออกจากหม้อน้ำกับเวลา ขณะเครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที



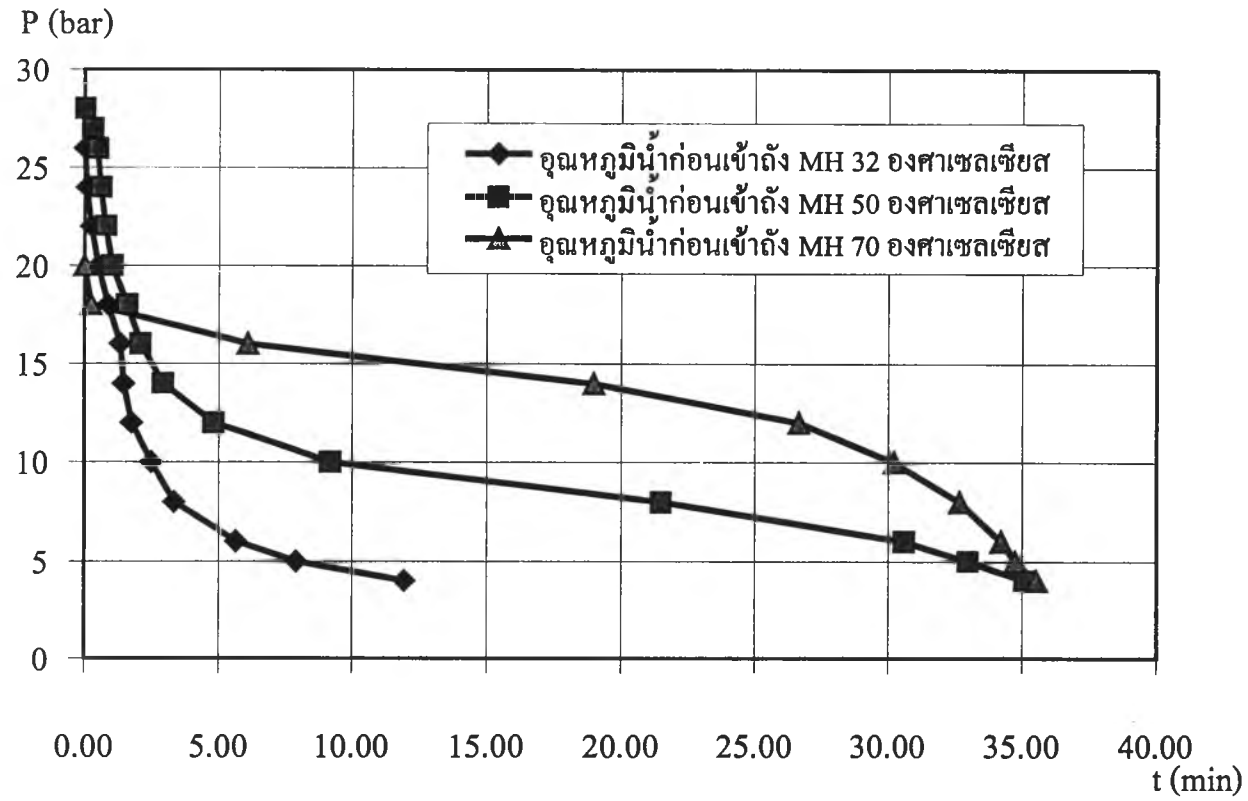
รูปที่ 6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำที่ระบายความร้อนออกจากเครื่องยนต์ อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้า-ออก และปริมาณความร้อนที่ระบายออกจากหม้อน้ำกับเวลา ขณะเครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที



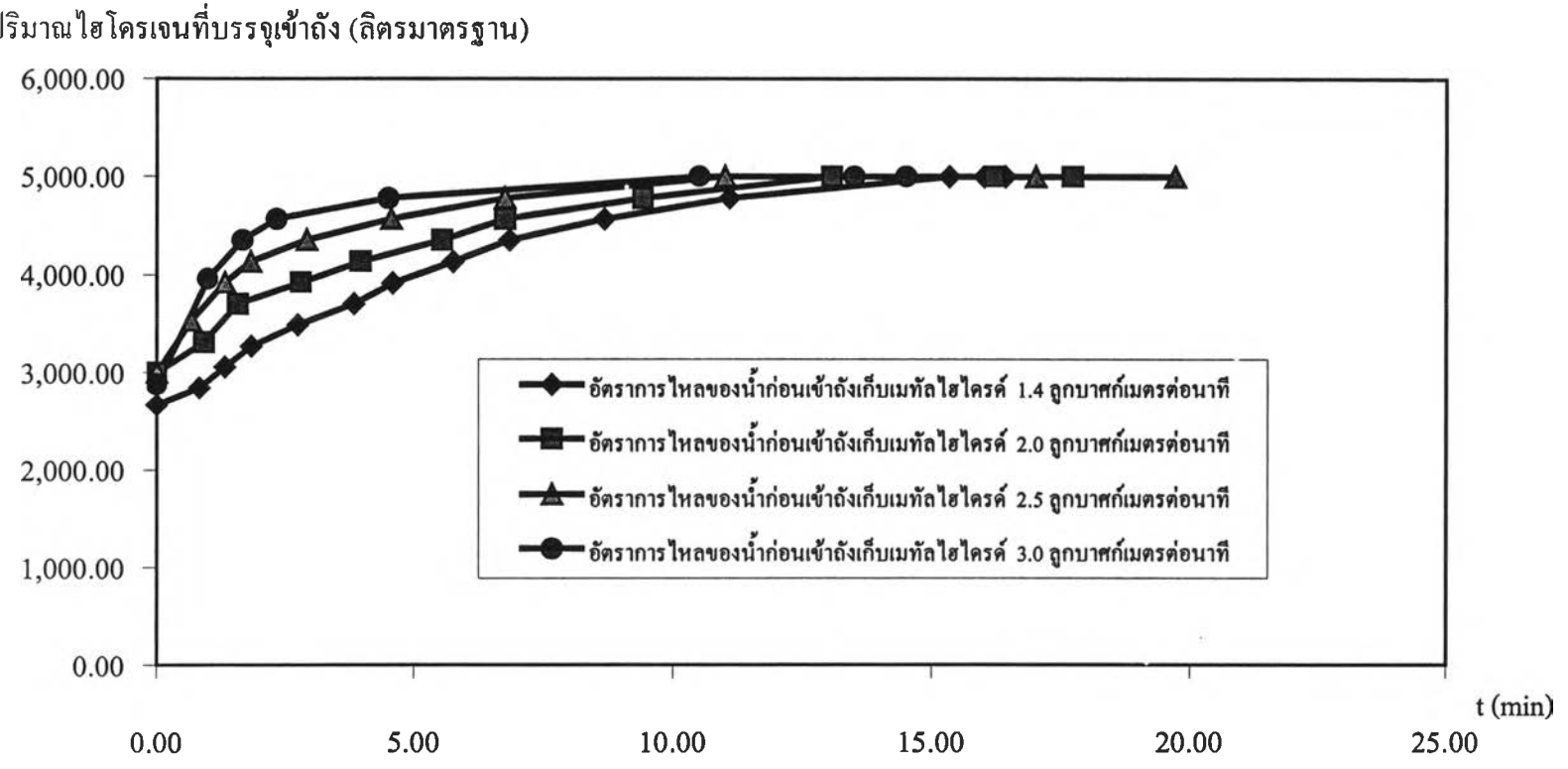
รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ความดันของก๊าซไฮโดรเจนออกจากถังเมทัลไฮไดรด์กับเวลา ขณะนำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ 32 องศาเซลเซียส



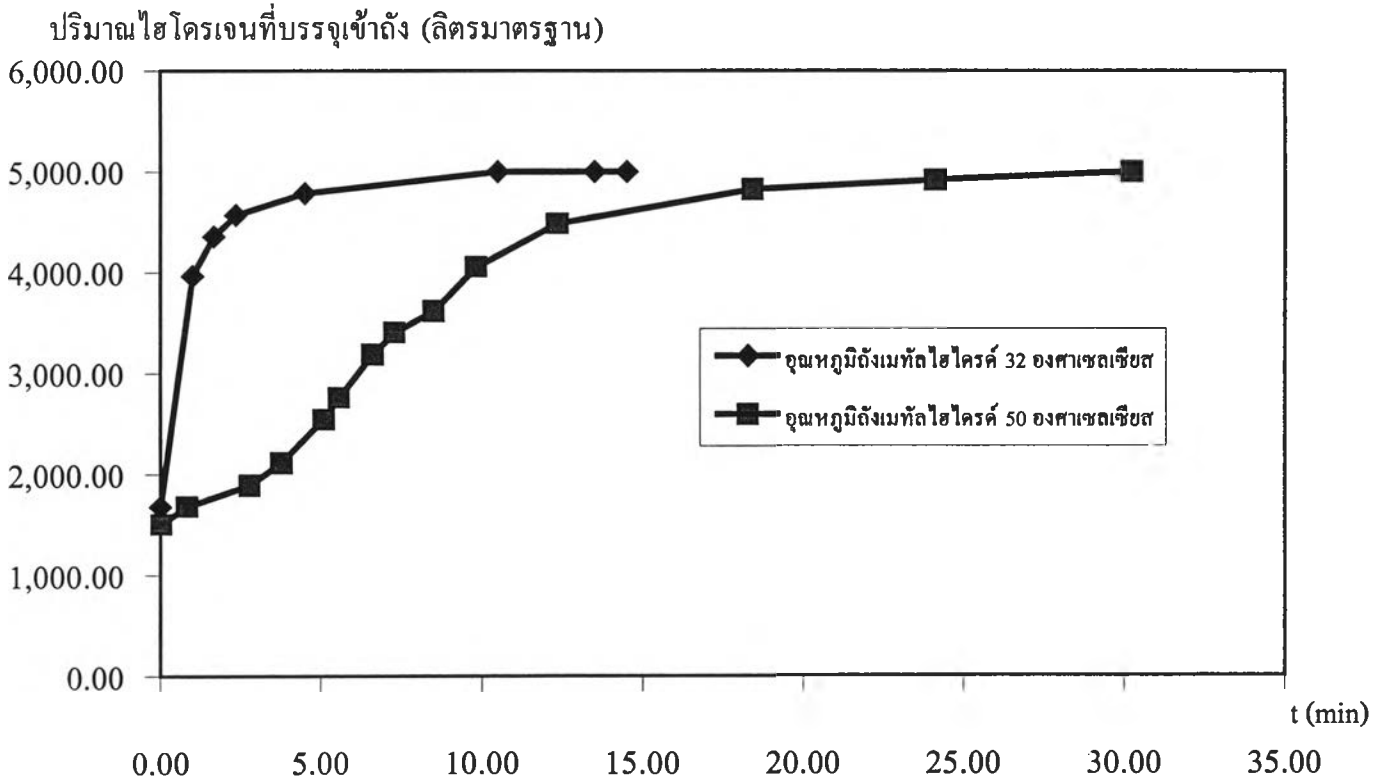
รูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ความดันของก๊าซไฮโดรเจนออกจากถังเมทัลไฮไดรด์กับเวลา ขณะนำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ที่อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ 50 องศาเซลเซียส



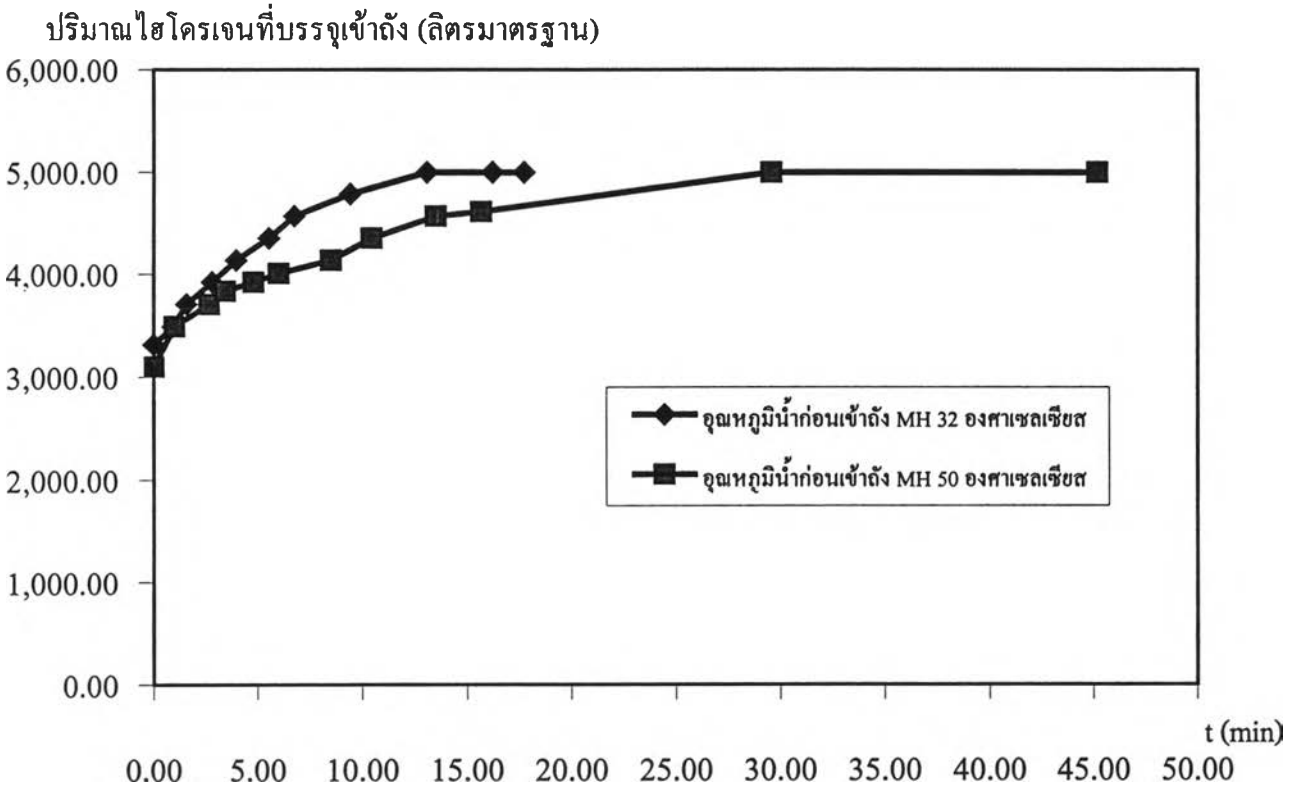
รูปที่ 6.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันของก๊าซไฮโดรเจนออกจากถังเมทัลไฮไดรด์กับเวลา ขณะนำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) เครื่องยนต์เดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที



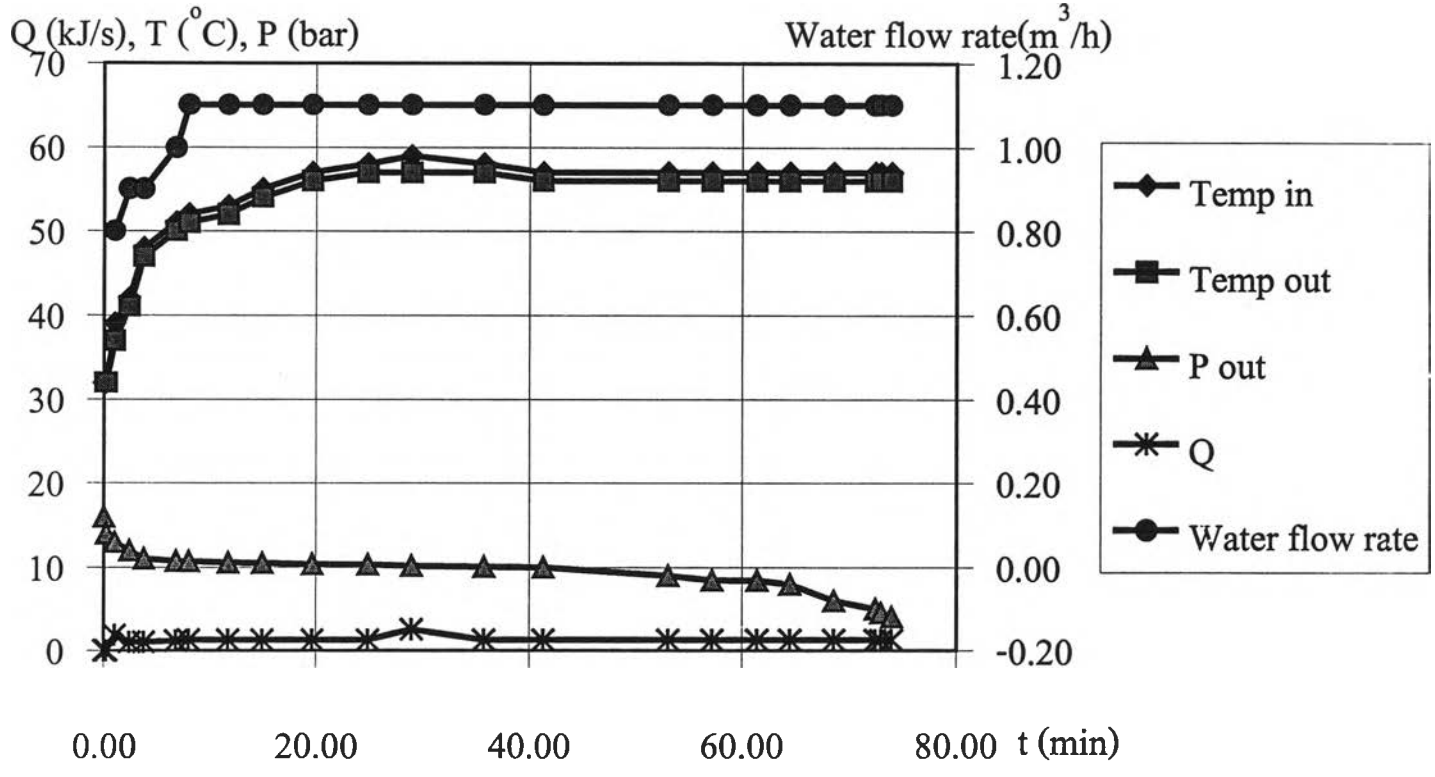
รูปที่ 6.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนที่บรรจุเข้าถังเมทัลไฮไดรด์กับเวลาที่ใช้ในการบรรจุไฮโดรเจน (charge) เข้าถัง อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์เท่ากับ 32 องศาเซลเซียส



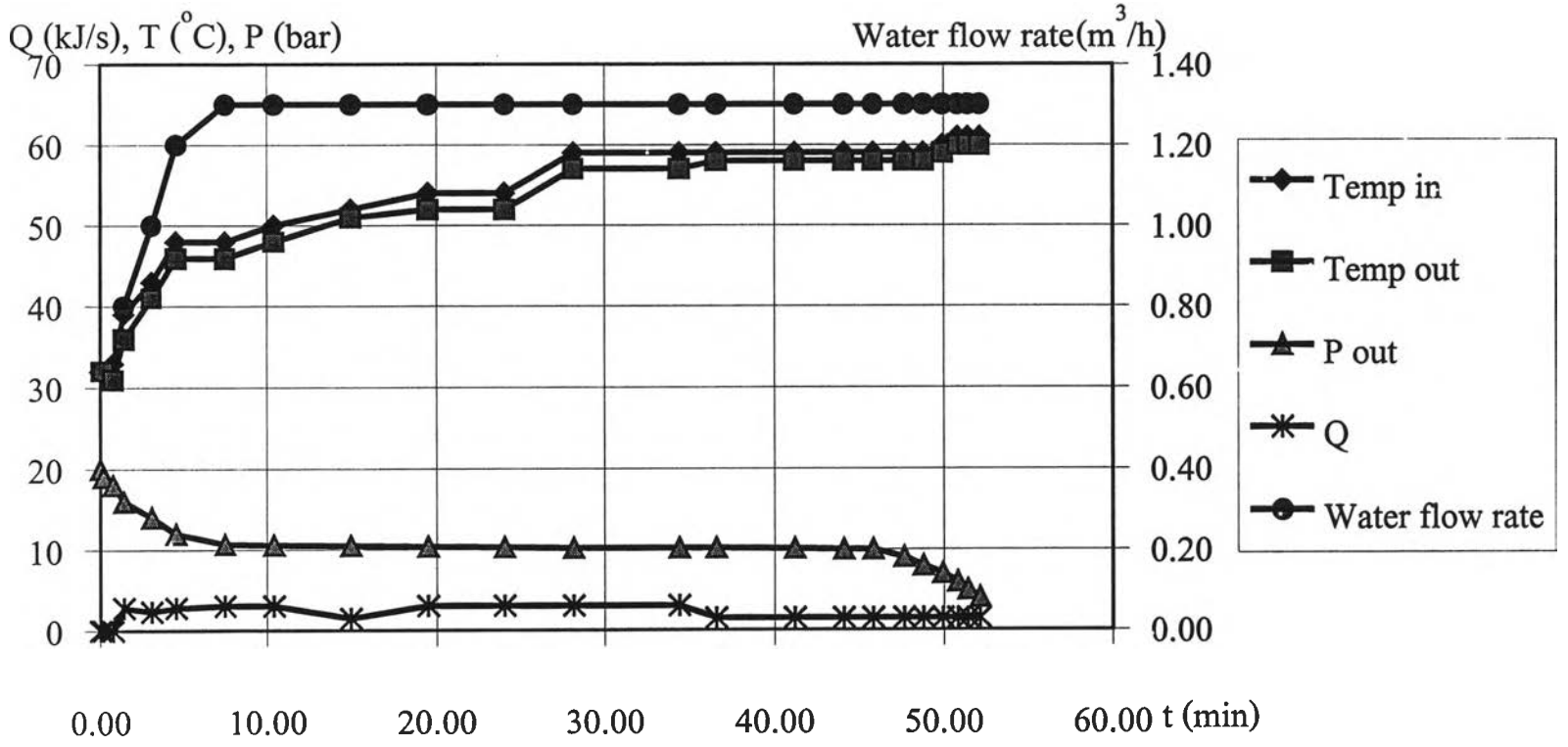
รูปที่ 6.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนที่บรรจุเข้าถังเมทัลไฮไดรด์กับเวลาที่ใช้ในการบรรจุไฮโดรเจน (charge) เข้าถัง ด้วยอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์เท่ากับ 3.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



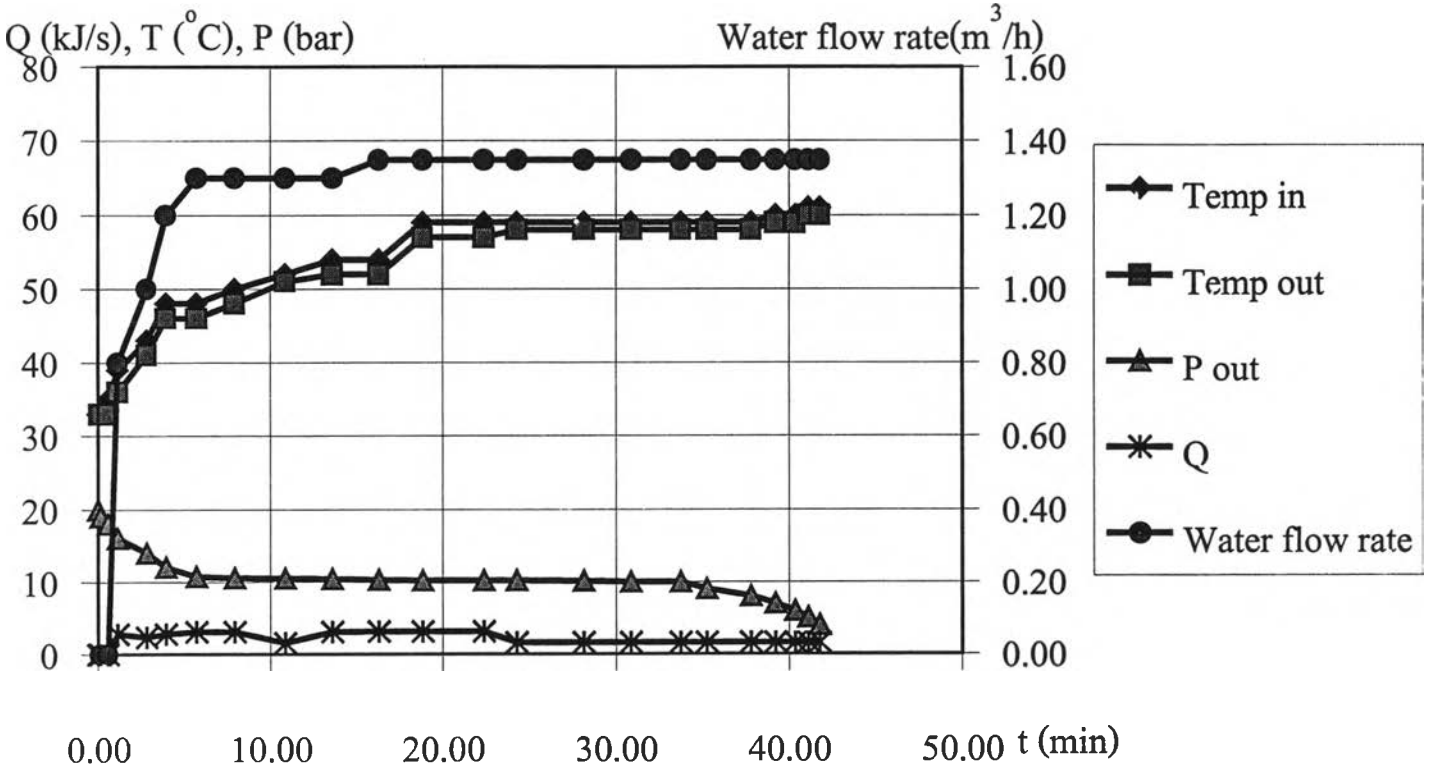
รูปที่6.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนที่บรรจุเข้าถังเมทัลไฮไดรด์กับเวลาที่ใช้ในการบรรจุไฮโดรเจน (charge) เข้าถัง ด้วยอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าถังเก็บเมทัลไฮไดรด์เท่ากับ 2.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



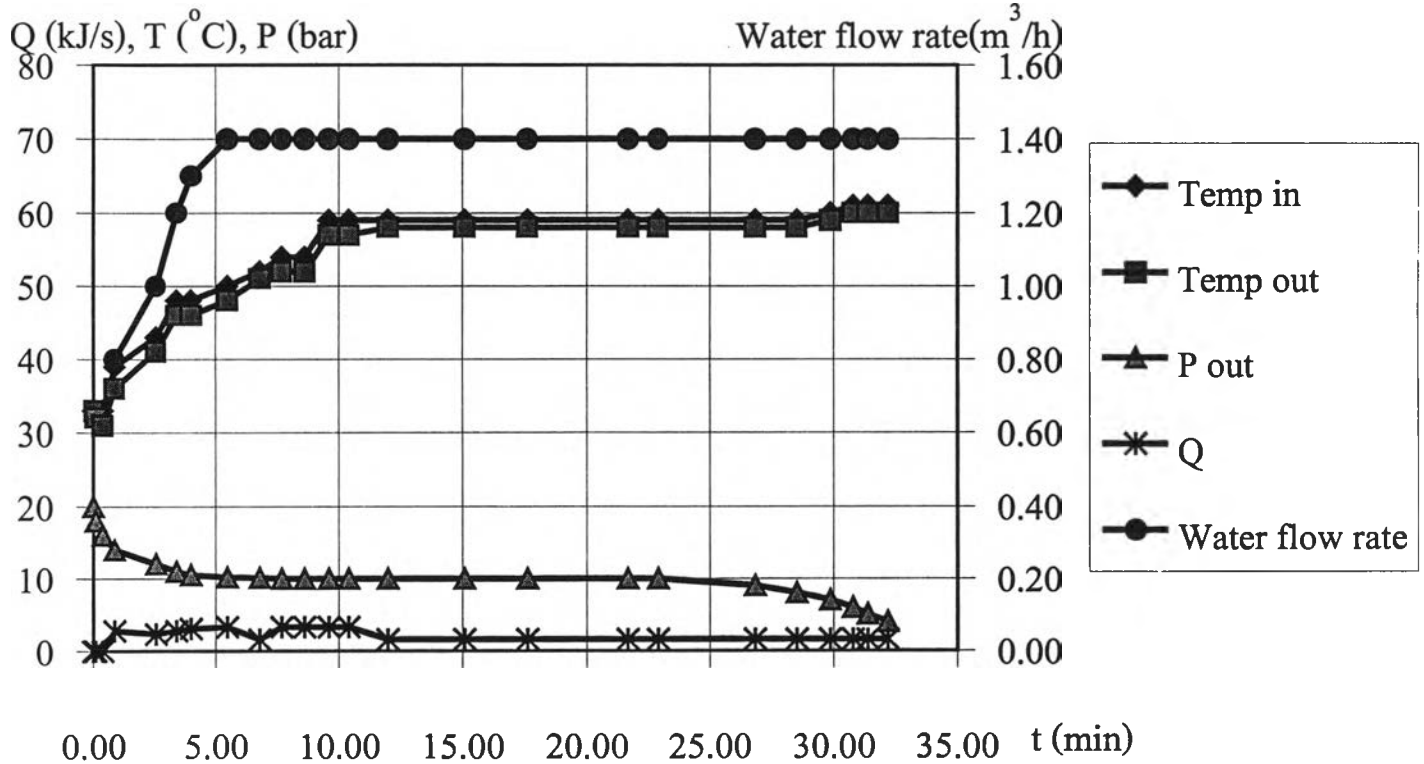
รูปที่ 6.22 แสดงสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจน เมื่อถังได้รับความร้อนจากน้ำร้อนหม้อน้ำในเครื่องยนต์กับเวลาที่นำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ขณะเครื่องเดินเบาที่ 1,200 รอบต่อนาที



รูปที่ 6.23 แสดงสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจน เมื่อถังได้รับความร้อนจากน้ำร้อนหม้อน้ำในเครื่องยนต์กับเวลาที่นำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ขณะเครื่องเดินเบาที่ 1,700 รอบต่อนาที



รูปที่ 6.24 แสดงสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจน เมื่อถังได้รับความร้อนจากน้ำร้อนหม้อน้ำในเครื่องยนต์กับเวลาที่นำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ขณะเครื่องเดินเบาที่ 2,000 รอบต่อนาที



รูปที่ 6.25 แสดงสมรรถนะของถังเก็บเมทัลไฮไดรด์ ขณะปล่อยก๊าซไฮโดรเจน เมื่อถังได้รับความร้อนจากน้ำร้อนหม้อน้ำในเครื่องยนต์กับเวลาที่นำไฮโดรเจนมาใช้ (discharge) ขณะเครื่องเดินเบาที่ 2,500 รอบต่อนาที