การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายใน

นายขวัญชัย จ้อยเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-635-515-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I๑๗๑๓๓๕๑

APPLICATION OF HYDROGEN AS A FUEL IN AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Mr. Kwanchai Choicharoen

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the requirement

for the degree of Master of Engineering

Department of Mechanical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1996

ISBN 974-635-515-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายใน
โดย	นายขวัญชัย จ้อยเจริญ
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.กุลธร ศิลปบรรเลง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ฉัตรชัย หงษ์อุเทน

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. กุลธร ศิลปบรรเลง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ฉัตรชัย หงษ์อุเทน)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศรี จงรุ่งเรือง)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ขวัญชัย จ้อยเจริญ : การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายใน (APPLICATION OF HYDROGEN AS A FUEL IN AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE) : อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.กุลธร ศิลปบรรเลง, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อาจารย์ฉัตรชัย หงษ์อุเทน : 111 หน้า ISBN 974-635-515-5

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาเพื่อหาองศาการจุดระเบิดที่เหมาะสมของเครื่องยนต์แกสโซลีนเมื่อใช้ แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ในการทดลองได้ใช้ทั้งน้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่ว และแกสไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์ 99.95% เป็นเชื้อเพลิงที่องศาการจุดระเบิด และความเร็วรอบต่าง ๆ ทุกการทดลองได้ทำการปรับส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิง และองศาการจุดระเบิดเพื่อให้ได้กำลังของเครื่องยนต์สูงที่สุด และนำผลจากการทดลองมาพิจารณาหาองศาการจุดระเบิดที่เหมาะสม โดยพิจารณาจาก กำลังสูงสุด, การใช้เชื้อเพลิงจำเพาะต่ำสุด และการน็อคจากเครื่องยนต์ นอกจากนั้นยังได้เปรียบเทียบสมรรถนะ และไอเสียจากเครื่องยนต์เมื่อใช้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิด

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถใช้ในเครื่องยนต์ที่มีอาศาการจุดระเบิดน้อยกว่าได้ดีกว่าน้ำมันเบนซิน องศาการจุดระเบิดที่เหมาะสมเมื่อใช้แกสไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ 0°BTDC กำลังสูงสุดเมื่อใช้แกสไฮโดรเจนจะต่ำกว่าใช้น้ำมันเบนซิน 43.04-63.26% ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำกว่า 54.55-60.60% และมลพิษจากไอเสียลดน้อยกว่า

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C615907 : MAJOR ENGINEERING
KEY WORD: HYDROGEN ENGINE/HYDROGEN PROPERTIES/MIXTURE FORMATION/ ENGINE PERFORMANCE/FLASHBACK/HYDROGEN STOAGE SYSTEM
KWANCHAI CHOICHAROEN : APPLICATION OF HYDROGEN AS A FUEL IN AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE. THESIS ADVISOR : ASSO.PROF.KULTHORN SILAPABANLENG,Ph.D.THESIS COADVISON : MR.CHATCHAI HONGUTEN, M.Eng. 111 pp. ISBN 974-635-515-5.

An experimental investigation was carried out on Stratified Charge Spark Ignition Engine in order to obtain the optimum ignition timing when using hydrogen as a substitute fuel.A comparison study of speed and ignition timing was conducted using both gasoline (super) and hydrogen (industrial grade) as fuels.

In each test,in order to obtain the optimum A/F ratio, the ignition timings were adjusted to obtain the maximum power without the engine knocking

The results show that hydrogen can be used as fuel providing that ignition timing is lower than gasoline. The optimum ignition timing for gasoline engine using hydrogen is found to be close to 0°BTDC. At this ignition timing, the engine reached maximum power with a minimum rate fo bsfc and no engine knocking observed. At other ignition timings, the use of hydrogen resulted in 43.04-63.26% less power, 54.55-60.60% lower rate of bsfc and 5 degree more advanced ignition timing respectively, when compared to running with gasoline. Further more, the use of hydrogen reduced the amount of HC by 97.77-98.04% and CO by 99.70-99.80 % in the exhaust emissions.

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา ๒๕๓๑ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถทำได้สำเร็จลุล่วง เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร.กุลธร ศิลปบรรเลง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ฉัตรชัย หงษ์อุเทน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งอาจารย์ทั้งสองท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิจัย นอกจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทั้งสองท่านแล้ว ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยซึ่งประกอบด้วย ครูสราวุธ อาปณกะพันธ์ ครูสนิท บรอฮีมี คุณถนอม อุดม และเจ้าหน้าที่จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยที่ได้รับจากงบประมาณแผ่นดิน ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดำรงค์ศักดิ์ มลิลา ซึ่งสนับสนุนเครื่องยนต์ในการทำวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งสนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครูอาจารย์ทุกท่าน ซึ่งได้อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา ขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งให้โอกาสผู้วิจัยได้ศึกษาเล่าเรียน จนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ช

สารบัญภาพ ..... ฌ

คำอธิบายสัญญาลักษณ์และคำย่อ ..... ฐ

บทที่

1. บทนำ 1
2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนและเครื่องยนต์ 8
3. วิธีการดัดแปลงระบบจ่ายเชื้อเพลิง 38
4. การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ 49
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 85

รายการอ้างอิง 88

ภาคผนวก 90

ประวัติผู้วิจัย 111

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของไฮโดรเจนและแกสโซลีน	35
2.2	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการเก็บไฮโดรเจนแต่ละวิธี	37
ก-1	แสดงผลการทดลองเครื่องยนต์ เมื่อใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง	91
ก-2	แสดงผลการทดลองเครื่องยนต์ เมื่อใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง แบบผสมภายใน ที่องศาการจุดระเบิด 0°BTDC	92
ก-3	แสดงผลการทดลองเครื่องยนต์ เมื่อใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง แบบผสมภายใน ที่องศาการจุดระเบิด 5°BTDC	93
ก-4	แสดงผลการทดลองเครื่องยนต์ เมื่อใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง แบบผสมภายใน ที่องศาการจุดระเบิด 10°BTDC	94
ก-5	แสดงผลการทดลองเครื่องยนต์ เมื่อใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง แบบผสมภายนอก ที่องศาการจุดระเบิด 0°BTDC	95
ก-6	แสดงผลการทดลองเครื่องยนต์ เมื่อใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง แบบผสมภายนอก ที่องศาการจุดระเบิด 5°BTDC	96
ก-7	แสดงผลการทดลองเครื่องยนต์ เมื่อใช้แกสไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง แบบผสมภายนอก ที่องศาการจุดระเบิด 10°BTDC	97
ง-1	แสดงคุณสมบัติของแกสไฮโดรเจน	104

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

1.1 เปอร์เซ็นต์สารพิษต่าง ๆ จากรถยนต์และแหล่งอื่น ๆ 2

2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเปลวไฟเนื่องจากส่วนประกอบและอุณหภูมิของส่วนผสม 9

2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานการเผาไหม้ต่ำสุดของไฮโดรเจน 10

2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงจำนวนสูงสุดของความร้อนที่ได้ในกระบอกสูบ 11

2.4 แสดงการเผาไหม้ของไฮโดรเจน 14

2.5 อัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศและเวลาของการเผาไหม้ 15

2.6 ระยะห่างของเขี้ยวหัวเทียนกับความเข้มข้นของส่วนผสมที่อัตราส่วนการอัดต่าง ๆ 17

2.7 ความดันสูงสุดที่อัตราส่วนการอัดต่างกันของเครื่องยนต์เดียวกัน 18

2.8 แสดงความเร็วของเปลวไฟ 20

2.9 การเคลื่อนที่ของเปลวไฟในห้องเผาไหม้ 21

2.10 กระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ 22

2.11 ความล่าช้าแห่งการจุดระเบิดและอุณหภูมิจุดระเบิดด้วยตัวเอง 23

2.12 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ 25

2.13 น็อคที่เกิดจากการสั่นของแกส 26

2.14 ผลของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่มีผลต่อความล่าช้าแห่งการจุดระเบิด 32

2.15 แสดงอัตราส่วนการอัด, การตั้งไฟ, ออกเทนนัมเบอร์ที่มีผลต่อการอัดและอุณหภูมิไอเสีย 32

3.1 แสดงเครื่องยนต์ Stratified charge spark ignition engine 44

3.2 แสดงแบบของมิกเซอร์แบบเจาะ 44

3.3 แสดงการต่อมิกเซอร์เข้ากับคาร์บูเรเตอร์ 45

3.4 แสดงห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก 45

3.5 แสดงตำแหน่งรูที่อุด 46

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.6 แสดงถังบรรจุแกสไฮโดรเจน, ลิ้นควบคุมแรงดัน และท่อทางเดินแกสไฮโดรเจน 46
3.7 แสดงท่อส่งแกส, ลิ้นควบคุมแรงดันแกสและจ่ายแกส, มิเตอร์วัดอัตราการไหลแกส, ลิ้นกันกลับ, อุปกรณ์กันเปลวไฟย้อนกลับและลิ้นระบายแรงดัน 47
3.8 แสดงการติดตั้งระบบจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจน 48
4.1 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดสอบเครื่องยนต์แกสโซลีน 42
4.2 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดสอบเครื่องยนต์ไฮโดรเจน 43
4.3 แสดงไดนาโมมิเตอร์ 44
4.4 แสดงเครื่องมือวัดอัตราการไหลของอากาศ 44
4.5 แสดงมาโนมิเตอร์ 45
4.6 แสดงเครื่องมือวัดอัตราการไหลของแกสไฮโดรเจน 45
4.7 แสดงเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย 46
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงองศาการจุดระเบิดเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แกสโซลีน 67
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงองศาการจุดระเบิดเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แกสโซลีน 68
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงองศาการจุดระเบิดเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แกสโซลีน 69
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับกำลังของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงองศาการจุดระเบิดเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แกสโซลีน 70

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ กับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อเปลี่ยนแปลง องศาการจุดระเบิดเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แกสโซลีน 71
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ กับกำลังของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงองศาการจุดระเบิด เปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แกสโซลีน 72
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (เมื่อคิดเป็นค่าความร้อน)กับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อ เปลี่ยนแปลงองศาการจุดระเบิดเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แกสโซลี 73
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (เมื่อคิดเป็นค่าความร้อน)กับกำลังของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อ เปลี่ยนแปลงองศาการจุดระเบิดเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แกสโซลีน 74
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแกสโซลีนกับความเร็วรอบ ของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงองศาการจุดระเบิด เปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แกสโซลีน 75
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแกสโซลีนกับกำลังของ เครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงองศาการจุดระเบิดเปรียบเทียบ กับเครื่องยนต์แกสโซลีน 76
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ HC กับกำลัง ของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่องศาการจุดระเบิด 0°BTDC เปรียบเทียบ กับเครื่องยนต์แกสโซลีน 77
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ CO กับกำลัง ของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่องศาการจุดระเบิด 0°BTDC เปรียบเทียบ กับเครื่องยนต์แกสโซลีน 78

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศกับเปอร์เซ็นต์ COของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนที่องศาการจุดระเบิด 0°BTDC เปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แกสโซลีน 79

4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงองศาการจุดระเบิดเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แกสโซลีน 80

4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงกับความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงองศาการจุดระเบิดเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แกสโซลีน ... 81

4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์กับภาระของเครื่องยนต์ไฮโดรเจนเมื่อเปลี่ยนแปลงองศาการจุดระเบิดเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์แกสโซลีน 82

4.24 แสดงสมรรถนะเครื่องยนต์แกสโซลีน 83

4.25 แสดงสมรรถนะเครื่องยนต์ไฮโดรเจน ที่ 0°BTDC 84

คำอธิบายสัญญาลักษณ์

Vd (Displacement volume)	=	ปริมาตรแทนที่ภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์
r_C (Compression ratio)	=	อัตราส่วนกำลังอัดของเครื่องยนต์
V_C (Clearance volume)	=	ปริมาตรของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์
TDC (Top dead center)	=	ตำแหน่งลูกสูบขณะอยู่ที่ศูนย์ตายบน
BDC (Bottom dead center)	=	ตำแหน่งลูกสูบขณะอยู่ที่ศูนย์ตายล่าง
5°BTDC	=	ตำแหน่งเพลาข้อเหวี่ยงหมุน 5 องศาก่อนลูกสูบถึงศูนย์ตายบน
Ignition timing	=	องศาการจุดระเบิด
Valve timing	=	องศาการเปิด-ปิดลิ้นไอดีและไอเสีย
$\dot{m}_a$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ
$\dot{m}_f$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง
[A/F] (Air-Fuel ratio)	=	ตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง
$[A/F]_{stoichiometric}$	=	อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎี
$[A/F]_{actual}$	=	อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในการเผาไหม้จริง
λ (Relative Air-Fuel ratio)	=	$\frac{[A/F]_{actual}}{[A/F]_{stoichiometric}}$
η_{th} (Brake Thermal Efficiency)	=	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน
bmep (Brake Mean Effective Pressure)	=	ความดันเฉลี่ยอินดิเคต
B_p (Brake Power Output)	=	กำลังขาออกของเครื่องยนต์
F (Brake Load)	=	ภาระของเครื่องยนต์
T (Torque)	=	แรงบิดของเครื่องยนต์
bsfc (Brake Specific Fuel Consumption)	=	ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ
n (Speed)	=	ความเร็วรอบของเครื่องยนต์

คำอธิบายสัญญาลักษณ์ (ต่อ)

T_e (Exhaust Temperature)	=	อุณหภูมิแกสไอเสีย
T_W(Cooling Water Temperature)	=	อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น
CO(Carbonmonoxide)	=	แกสคาร์บอนมอนอกไซด์
HC(Hydrocarbon)	=	แกสไฮโดรคาร์บอน