การปรับค่าการไหลวนของอากาศในห้องเผาไหม้เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์

Swirl Adjustment for Engine Performance Improvement

คณิต วัฒนวิเชียร* พงษ์ภัทร พุกะนัดด์ พิพัฒน์ ตันติเวชการวงศ์ พัชราภรณ์ ปิยะวัฒนะนนท์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อีเมล์ : wkanit@chula.ac.th

Kanit Wattanavichien.* Pongpat Phukanud. Pipat Tantivedchakarnwong. Patcharaporn Piyawattananon
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.
E-mail : wkanit@chula.ac.th

บทคัดย่อ

การปรับการไหลวนของอากาศในห้องเผาไหม้เป็นแนวทางหนึ่งที่นิยมใช้ในการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์ บทความนี้จะนำเสนอแนวคิด ขั้นตอนในการปรับปรุงค่าการไหลวนของอากาศ และผลการทดสอบที่ได้จากการประยุกต์ใช้หลักการดังกล่าวเพื่อเพิ่มสมรรถนะและลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เล็กขนาด 200 cc ที่ใช้ในรถจักรยานยนต์ ทั้งที่กระทำการทดสอบฝาสูบบนแท่นทดสอบการไหลวนในห้องเผาไหม้ และที่กระทำการทดสอบเครื่องยนต์บนแท่นทดสอบเครื่องยนต์

จากผลการทดสอบฝาสูบบนแท่นทดสอบการไหลวนในห้องเผาไหม้พบว่าแนวคิดที่นำมาประยุกต์ใช้นี้สามารถปรับปรุงค่า Swirl โดยรักษาระดับของค่า Tumble ได้ และเมื่อนำเครื่องยนต์ที่ใช้ฝาสูบที่ปรับค่าการไหลวนมาทดสอบบนแท่นทดสอบเครื่องยนต์พบว่าค่าแรงบิดที่ได้จากเครื่องยนต์เปลี่ยนแปลงไปตามค่า Swirl ที่เปลี่ยนไป โดยเมื่อมี Swirl มากขึ้นจะทำให้ค่าแรงบิดลดน้อยลงตามลำดับ และหากเป็น Swirl ในทิศทางไม่เหมาะสมแล้วก็ลดทอนให้แรงบิดมีค่าน้อยลงไปอีก นอกจากนี้การปรับเพิ่มความยาวท่อไอดีก็ยังให้สมรรถนะที่ดีขึ้นกว่าเดิมด้วย ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงการไหลวนในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ให้ผลดีที่สุดคือห้องเผาไหม้มีการไหลวนแบบ Tumble และแบบ Swirl ในทิศทางที่เหมาะสมและไม่มากเกินไป

Abstract

The swirl adjustment in combustion chamber is one of the popular ways that used for improving the engine performance. This article will introduce ideas, steps, and procedure of adjusting the in cylinder swirl. Also, this will introduce the results of using these ideas for improving engine performance, and reducing the fuel consumption of a small 200cc. SI motorbike, engine. The presented results are either from the testing swirl and tumble of the cylinder head with impulse swirl meter, or testing the engine performance with engine dynamometer.

The results of testing the cylinder head with impulse swirl meter showed that the applied ideas could adjust the swirl number without changing the tumble number. In addition, the results of engine performance testing with engine dynamometer showed that the engine torque may be changed with respect to the change of the swirl. Likewise, if the swirl is increased too high, the engine torque will also be reduced. Moreover, the engine torque will also be greater reduced if the direction of the swirl is not suitable. Besides, the elongation of the intake manifold is also improving the performance. From these results, the swirl adjustment in combustion chamber of the engine which cause the best improvement is adjusting tumble and swirl in the suitable direction with an appropriated amount.

1. บทนำ

การศึกษาผลของการปรับค่าการไหลวนของอากาศในห้องเผาไหม้เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์ ได้ดำเนินการโดยการปรับปรุงเครื่องยนต์เล็ก ขนาด 200 cc เพื่อการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์และเพื่อลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์นี้ ด้วยแนวทางดังกล่าว โดยดำเนินการทั้งทดสอบด้วยการปรับปรุงการไหลวนของอากาศในห้องเผาไหม้บนแท่นทดสอบการไหลและทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ด้วยการทดสอบบนแท่นทดสอบเครื่องยนต์ เพื่อให้ได้ต้นแบบสำหรับการปรับปรุงเครื่องยนต์เดิมนี้ตามความต้องการต่อไป

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องยนต์จากทางบริษัท พี ดี เค จำกัด ซึ่งเป็นศูนย์วิจัยและพัฒนาของรถจักรยานยนต์ไทเกอร์ ซึ่งเป็นรถจักรยานยนต์ที่ทำการผลิตและจำหน่ายทั้งในประเทศและส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ที่มีเจ้าของเป็นคนไทย

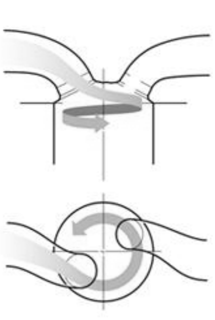
โดยเครื่องยนต์ที่นำมาใช้ในโครงการนี้ เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้ในจักรยานยนต์รุ่น Boxer ดังรูปที่ 1 มีปัญหาหลักที่พบก็คือปัญหาด้านความร้อนและเสียงดัง ซึ่งโดยหลักวิชาการแล้ว หากสามารถทำให้สมรรถนะดีขึ้น ความร้อนก็จะลดลงเนื่องจากการลดลงของการสูญเสียในรูปความร้อน

รูปที่ 1 ภาพรถจักรยานยนต์รุ่น Boxer

2. การไหลวนภายในห้องเผาไหม้ และผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์

การไหลวนของอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ตามหลักทฤษฎีแล้ว จำแนกได้เป็น 2 แบบ คือ Swirl และ Tumble

Swirl กล่าวโดยย่อได้ว่าเป็นการไหลวนรอบแกนกระบอกสูบ ดังรูป 2 โดยปกตินิยมใช้ช่วยเร่งการเผาไหม้สำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด แต่สำหรับเครื่องยนต์ในโครงการนี้ swirl ก็มีความต้องการอยู่แต่ไม่สูงนัก เพราะว่าตำแหน่งของหัวเทียนไม่ได้อยู่กลางห้องเผาไหม้ จึงต้องการ swirl ในการช่วยพัดพาเปลวไฟให้ลามไปทั้งห้องเผาไหม้

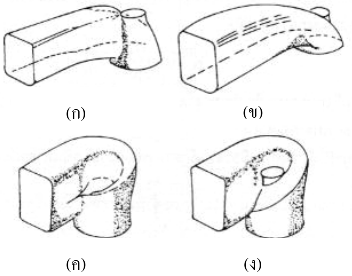


รูปที่ 2 Swirl

รูปที่ 3 Tumble

Tumble กล่าวโดยย่อได้ว่าเป็นการไหลวนรอบแนวแกนที่ตั้งฉากกับแกนของกระบอกสูบ ดังรูป 3 ซึ่งการไหลวนแบบ Tumble นี้ จะเป็นการไหลวนที่เหมาะสำหรับเพิ่มปริมาณอลวน (turbulence intensity) สำหรับเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟ หรือเครื่องยนต์เบนซินซึ่งก็คือเครื่องยนต์รุ่นที่ใช้ในโครงงานนี้นั่นเอง

วิธีทั่วไปที่ใช้ทำให้เกิดการไหลวนในช่วงการดูด คือ ทำให้การไหลของไอดีเข้าไปในกระบอกสูบในทิศทางสัมผัสกับผนังกระบอกสูบซึ่งไอดีก็จะหมุนวนลงในกระบอกสูบได้แก่ การใช้ผนังเบี่ยงเบน (Deflector Wall) ของช่องไอดีเพื่อบังคับให้การไหลส่วนใหญ่ผ่านวาล์วออกไปในทิศทางสัมผัสกับผนังกระบอกสูบ และการใช้ช่องไอดีบังคับ (Directed Port) เพื่อให้การไหลไปยังช่องเปิดวาล์วในทิศทางสัมผัสกับผนังกระบอกสูบที่ต้องการ ส่วนวิธีที่สองก็คือ การทำให้ช่องไอดีขดเป็นวงซึ่งมีทั้งแบบลาดชันน้อยและแบบลาดชันมาก การปรับด้วยช่องไอดีแสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบต่างๆของช่องไอดีที่ทำให้เกิดการไหลวน (ก) ผนังเบี่ยงเบน (ข) ช่องบังคับ (ค) ช่องไอดีขดเป็นวงชันน้อย (ง) ช่องไอดีขดเป็นวงชันมาก

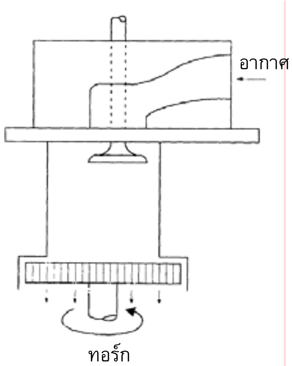
3. การทดสอบ

การทดสอบเพื่อการปรับปรุงค่าการไหลวน เพื่อการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์ จะแบ่งการทดสอบออกได้เป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบค่าการไหลวนของอากาศในห้องเผาไหม้ และ การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

3.1 การทดสอบการไหลวนของอากาศในห้องเผาไหม้

การทดสอบการไหลวนกระทำที่ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์สันดาปภายใน ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้เครื่องมือ Impulse Swirl Meter เป็นเครื่องมือในการวัดดังรูปที่ 5 ซึ่งค่าที่อ่านออกมาได้เป็นค่าแรงบิดของอากาศที่ไหลผ่านรังผึ้ง (Honeycomb) ดังรูปที่ 6 ซึ่งอยู่ขวางการไหลของอากาศหลังผ่านท่อไอดีและฝาสูบแล้ว

รูปที่ 5 เครื่องทดสอบการไหลวน



รูปที่ 6 แสดงการวัดการไหลวน

ค่าแรงบิดที่วัดได้จะแสดงผลในรูปของค่าของ Swirl และ Tumble หลังจากถูกประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ที่ต่อเชื่อม ทั้งยังสามารถ

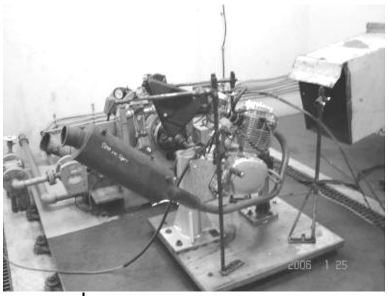
คำนวณหา ปริมาณการไหลของอากาศโดยรวมตลอดช่วงการยกตัวของวาล์ว และปริมาณของ Swirl และ Tumble โดยรวมตลอดช่วงนี้ได้ด้วยโดยคิดเป็นค่าโมเมนตัม ด้วยสมการที่ 1

Angular momentum of charge at end of induction $(I_c\omega_c)$

$$I_c\omega_c = \rho\frac{BAV_o^2}{8\omega_E}\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_F N_R d\alpha \qquad (1)$$

3.2 การทดสอบสมรรถนะ

การทดสอบสมรรถนะซึ่งกระทำโดยสภาวะคงตัวที่ความเร็วคงที่ในห้องทดสอบสมรรถนะของบริษัท พี ดี เค จำกัด ดังรูปที่ 7 โดยมีรายละเอียดอุปกรณ์การทดสอบสมรรถนะดังนี้



รูปที่ 7 ภาพการทดสอบสมรรถนะ

Dynamometer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ โดยการใส่โหลดให้กับเครื่องยนต์ ในการทดลองนี้จะใส่โหลดด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า แล้วส่งผลจากการวัดมาแสดงผลที่ชุดควบคุม (Controller)

Controller เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมความต้องการในการทดลอง เช่น ความเร็วรอบคงที่, ทอร์กคงที่ เป็นต้น และสามารถอ่านค่าแรงบิดและความเร็วรอบได้จากอุปกรณ์นี้ โดยมีความละเอียด 0.01 kg-m และ 1 rpm ตามลำดับ

Digital Fuel Consumption Meter เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง โดยจะทำการวัดออกมาในรูปของเวลาที่ใช้เชื้อเพลิงในปริมาณที่กำหนด มีความละเอียด 0.1 วินาที

เทอร์โมมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิน้ำมันเครื่อง, อุณหภูมิห้อง เป็นต้น

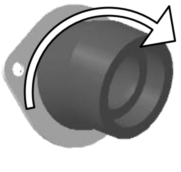
3.3 การสร้างต้นแบบเพื่อการทดสอบ

การทดสอบเพื่อการปรับปรุงการไหลวนนั้น กระทำโดยการปรับเปลี่ยนลักษณะของการไหลของไอดีที่ไหลผ่านท่อไอดี และฝาสูบ เพื่อให้เกิดการไหลวนของอากาศในห้องเผาไหม้ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งทั้งท่อไอดี และ ฝาสูบแบบเดิมมีลักษณะการไหลวนรูปแบบของมันเองอยู่แล้ว

การนำไปทดสอบนั้นจำเป็นต้องมีท่อไอดีต้นแบบเพื่อการทดสอบ โดยการทดสอบจะทำเพื่อดูผลของการปรับเปลี่ยนเส้นทางการไหลของไอดี โดยการปรับหมุนการยึดของท่อไอดีกับฝาสูบ ที่มุมการยึดที่แตกต่างกันออกไป โดยลักษณะการโค้งของท่อไอดียังคงเป็นตัวเดิม

ต้นแบบนี้คือการนำท่อไอดีเดิมที่มีอยู่แล้วดังรูปที่ 8 มาตัดจุดยึดออก ซึ่งจะได้ดังรูปที่ 9 และ ทำหน้าแปลนใหม่ที่มีจุดยึดเหมือนเดิมดังรูปที่ 10 มาสวมเข้าไปเป็นตัวยึดท่อไอดีกับเครื่องยนต์ จะได้ดังรูปที่ 11 ซึ่งจะทำให้สามารถหมุนปรับเปลี่ยนการเชื่อมต่อท่อดีกับฝาสูบได้อย่างอิสระดังลูกศรในภาพ

รูปที่ 8 ท่อไอดีแบบเดิม รูปที่ 9 ท่อไอดีที่ปรับปรุง



รูปที่ 10 หน้าแปลนใหม่ รูปที่ 11 ภาพหลังประกอบ

เมื่อทำให้สามารถหมุนได้แล้วยังต้องเชื่อมต่อกับคาร์บูเรเตอร์ โดยให้คาร์บูเรเตอร์ สามารถตั้งอยู่ในแนวระดับ ซึ่งเป็นแนวการทำงานของคาร์บูเรเตอร์ขณะทำการหมุนได้ด้วย ซึ่งได้ทำจากการนำท่อยางมาต่อเข้าไปแล้วรัดด้วยสายรัดโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับท่อไอดีเพื่อให้สามารถบิดงอให้คาร์บูเรเตอร์ตั้งได้ ซึ่งจะได้ต้นแบบสุดท้ายดังรูปที่ 12

รูปที่ 12 ภาพท่อไอดีจริงสำหรับการทดสอบ

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

ข้อมูลของเครื่องยนต์ของรถจักรยานยนต์ไทเกอร์รุ่น Boxer ได้จากคู่มือ และ จากการวัดต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

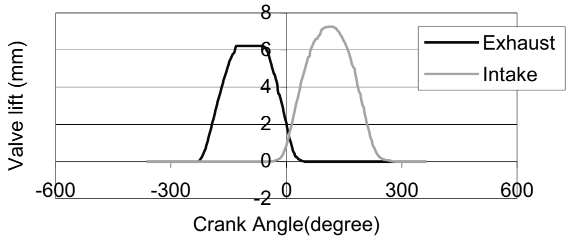
4.1 ข้อมูลทั่วไปของเครื่องยนต์

ข้อมูลทั่วไปของเครื่องยนต์เป็นข้อมูลจากการวัดดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลของเครื่องยนต์

ข้อมูล	หน่วย	ขนาด
ปริมาตรกระบอกสูบ	cc	200
Bore	mm	69
Stroke	mm	53

4.2 แผนภาพการยกตัวของวาล์ว

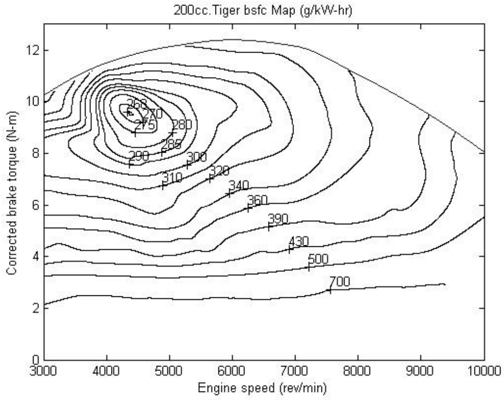


รูปที่ 13 แผนภาพการยกตัวของวาล์วของเครื่องยนต์

รูปที่ 13 เป็นแผนภาพแสดงระยะยกตัวของวาล์วเทียบกับองศาของเพลาข้อเหวี่ยง ซึ่งมีไว้ใช้ในการพิจารณาเกี่ยวกับการไหลวนของไอดีเนื่องจากการไหลของไอดีจะมีการเปลี่ยนแปลงตามการยกตัวของวาล์วไอดี

4.3 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เดิม

โดยการทดสอบสมรรถนะจะเป็นการทดสอบด้วยความเร็วคงที่ ณ สภาวะคงตัวแบบ Full Map Test ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 14

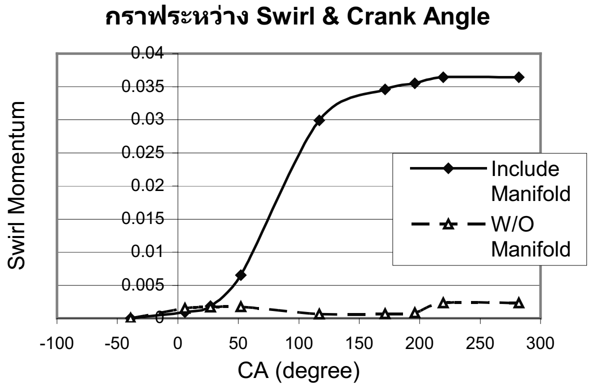


รูปที่ 14 แผนภาพสมรรถนะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ

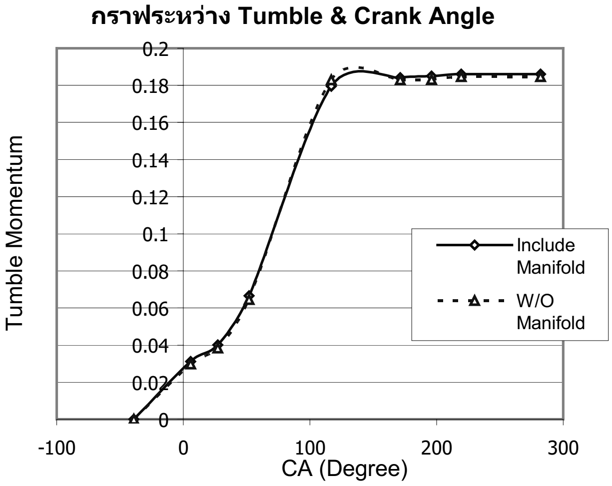
4.4 การทดสอบการไหลวนของเครื่องยนต์เดิม

การไหลวนของเครื่องยนต์เดิมทำการทดสอบเพื่อให้เห็นว่าเดิมเฉพาะฝาสูบมีการไหลวนอย่างไร และเมื่อประกอบท่อไอดีแล้วมีผลอย่างไร เพราะการปรับปรุงจะเป็นการปรับโดยการหมุนท่อไอดีที่ต่อให้เปลี่ยนไปจากเดิมเป็นมุมต่างๆ กันจึงจำเป็นต้องทดสอบเป็น การไหลวนเฉพาะฝาสูบ และการไหลวนเมื่อประกอบท่อไอดีเพราะจะได้เห็นว่าท่อไอดีมีผลอย่างไร

จากรูปที่ 15 และ 16 ค่า Swirl และ Tumble เป็นค่าโมเมนตัมรวมของ Swirl และ Tumble ที่เกิดขึ้นในกระบอกสูบรวมตลอดทั้งช่วงการเปิดของวาล์ว ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่า Tumble แตกต่างกันไม่มากนัก ซึ่งไม่เกิน 5 % แต่ Swirl ระหว่างมีท่อไอดีกับไม่มีแตกต่างกันมาก ซึ่งทำให้พบว่าท่อไอดีเป็นตัวสร้าง Swirl ดังนั้นการปรับปรุงก็สามารถปรับปรุงที่ท่อไอดีดังที่กล่าวได้



รูปที่ 15 กราฟเปรียบเทียบ Swirl ระหว่างฝาสูบที่ประกอบท่อไอดีกับ เฉพาะฝาสูบเท่านั้น



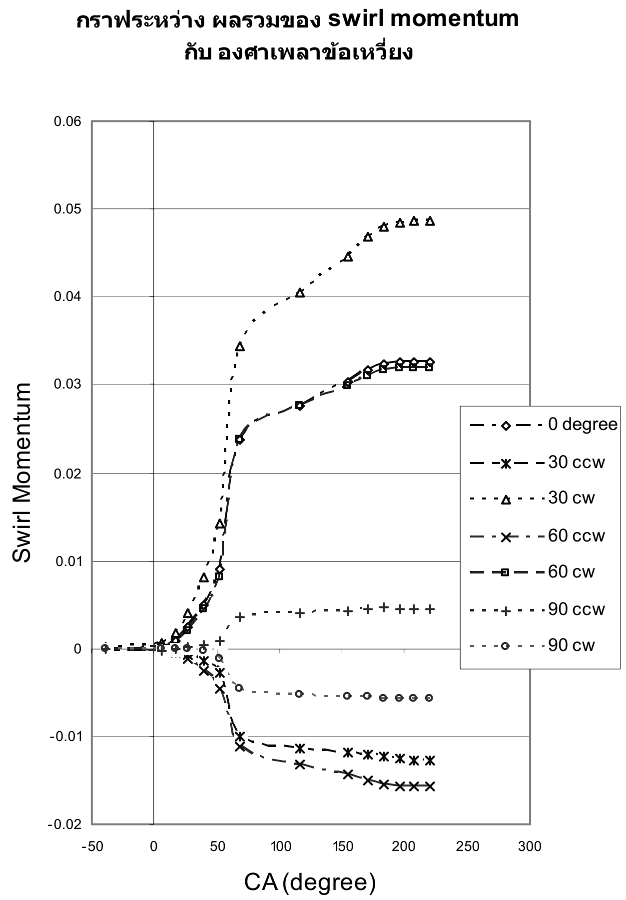
รูปที่ 16 กราฟเปรียบเทียบ Tumble ระหว่างฝาสูบที่ประกอบท่อไอดี กับ เฉพาะฝาสูบเท่านั้น

4.5 การทดสอบและผลหลังการปรับปรุง

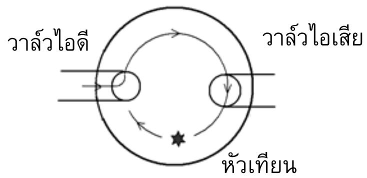
การทดสอบจะถูกออกแบบให้ทดสอบที่การปรับหมุนท่อไอดีต่อไปทุก 30 องศาจนถึง 90 องศา ทั้งทางทวนเข็มนาฬิกาและทางตามเข็มนาฬิกา ซึ่งจะได้ผลการทดสอบออกเป็น ผลการทดสอบการไหลวนและผลการทดสอบสมรรถนะ ซึ่งต้นแบบที่ใช้จะมีการเปลี่ยนแปลงจากท่อไอดีเดิมดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.3 ซึ่งทำให้มีความแตกต่างคือความยาวที่ยาวขึ้น จะทำการเปรียบเทียบระหว่างท่อไอดีเดิม กับท่อที่ยาวขึ้นที่ยังไม่ได้ทำการปรับหมุน และเปรียบเทียบผลการปรับหมุนที่ท่อไอดีที่ยาวขึ้นแล้ว เพื่อให้สามารถเทียบผลของเฉพาะการปรับหมุนได้ด้วย ซึ่งได้ผลดังนี้

ผลในด้านของการไหลวนดูได้จากผลรวมของ charge momentum ที่ได้จากการนำค่าจากการทดสอบมาคำนวณ ด้วยสมการที่ 1 ตลอดช่วงที่มีการดูดตามองศาเพลาข้อเหวี่ยงที่ได้จากแผนภาพการยกตัวของวาล์วดังรูปที่ 13 ซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 17

จากรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่าที่ให้ค่า Swirl สูงสุดคือเมื่อหมุนท่อไอดีที่ 30 องศาตามเข็มนาฬิกา และมีการเรียงตามลำดับค่า Swirl จากการหมุนท่อไอดี ดังนี้ 30 CW > 0 degree > 60 CW > 90 CCW > 90 CW > 30 CCW > 60 CCW ซึ่ง CW คือตามเข็มนาฬิกา และ CCW คือทวนเข็มนาฬิกา โดยที่ 30, 60 CCW และ 90 CW นั้น Swirl มีการกลับทิศทางการหมุนจากเดิม (ซึ่งการไหลวนของเดิมดังรูปที่ 18 เดิมเป็นแบบที่ไม่เหมาะสมคือหมุนไปหาไอดีทำให้ช่วงการขยายตัวของเปลวไฟเกิดได้ช้า) สามจุดนี้ก็น่าจะทำให้อัตราการขยายตัวของเปลวไฟเกิดได้เร็วกว่า และได้ Swirl ที่ไม่มากด้วย



รูปที่ 17 กราฟระหว่าง ผลรวม Swirl Momentum กับ องศาเพลาข้อเหวี่ยง

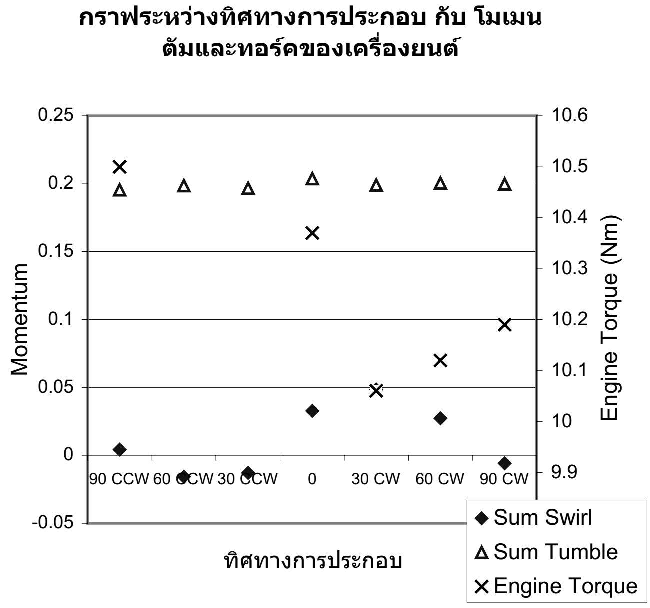


รูปที่ 18 ทิศทางการไหลวนที่ช่วงการขยายตัวของเปลวไฟเกิดได้ช้า

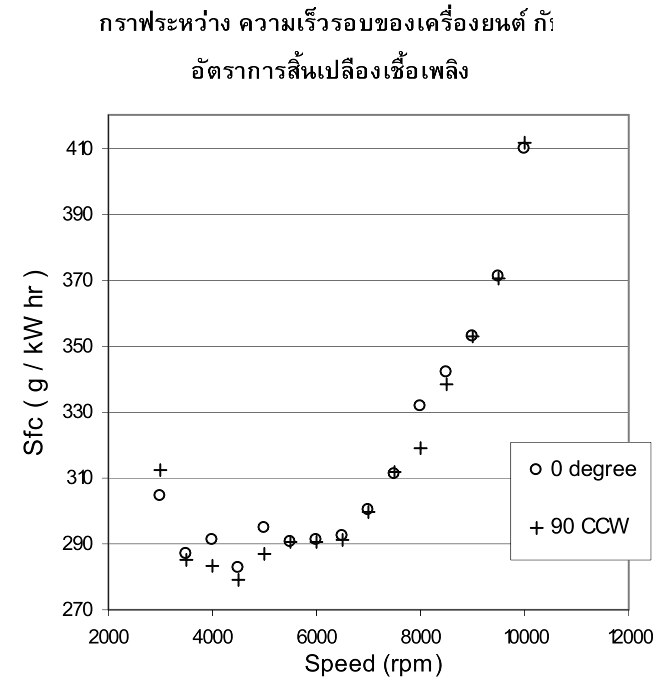
สำหรับการทดสอบผลของการไหลวนที่มีต่อสมรรถนะจะทำการทดสอบด้วยความเร็วคงที่สภาวะคงตัวที่ Full Load ซึ่งผลการทดสอบสมรรถนะแสดงเป็นภาพรวมดังรูปที่ 19 เมื่อเปรียบเทียบแรงบิด (Torque) จะได้ว่า

90CCW > 0 degree> 90CW > 60CW > 30CW

ซึ่ง Tumble มีค่าใกล้เคียงกันแตกต่างกันไม่เกิน 5% เท่านั้น ดังนั้นผลก็คือว่า แรงบิดที่ได้เปลี่ยนแปลงตามลักษณะของ Swirl



รูปที่ 19 รูปเปรียบเทียบผลระหว่าง Engine Torque กับค่า Swirl และ Tumble ที่ทิศทางการปรับปรุงแบบต่างๆ



รูปที่ 20 เป็นกราฟเปรียบเทียบ Sfc กับความเร็วรอบ ที่การปรับหมุนท่อไอดีต่างๆ

และรูปที่ 20 แสดงผลของ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Sfc) จะได้ว่าการปรับหมุนท่อไอดีในทิศทางทวนเข็ม 90 CCW จะให้ค่า Sfc ที่ต่ำลงด้วย

5. สรุปผลแนวทางการปรับปรุง

แนวทางการปรับปรุงเพื่อให้ได้สมรรถนะที่ดีขึ้นนั้นน่าจะทำได้โดยการปรับหมุนท่อไอดี 30 CCW 60 CCW และ 90 CW ซึ่งค่า Swirl มีทิศทางที่เหมาะสมและไม่มากเกินไป ส่วนผลด้าน Sfc ก็สามารถปรับให้ดีขึ้นได้โดยการหมุนท่อไอดีในทิศทางทวนเข็ม นอกจากนี้ ท่อไอดีที่ปรับปรุงให้มีความยาวมากขึ้นก็ทำให้ได้สมรรถนะที่ดีขึ้นกว่าเดิมทั้งหมดด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท พี ดี เค จำกัด และทีมวิศวกรของบริษัทที่ให้การสนับสนุนโครงการ ซึ่งโครงการนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการโครงงานอุตสาหกรรมสำหรับปริญญาตรี ประจำปี 2548

เอกสารอ้างอิง

[1] Wattanavichien, K. 1995, NG SI Engine Driven Heat Pump, Ph.D Thesis, The University of Melbourne.

[2] C. R. Stone and N. Ladommatos, 1992, The Measurement and Analysis of Swirl in Steady Flow, Brunel University

[3] Heywood, LB, 1986, Internal Combustion Engine Fundamentals, London: McGraw Hill.