

การสังเกตการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ

FLOW VISUALIZATION IN FOUR STROKE ENGINE

โดย

นายธนาวุธ

สุขประเสริฐ

นายศิริพงศ์

อดิพันธ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์อวิชชัย นาคพิพัฒน์

อาจารย์อรรถสรพงศ์ สุนทรชาติ

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

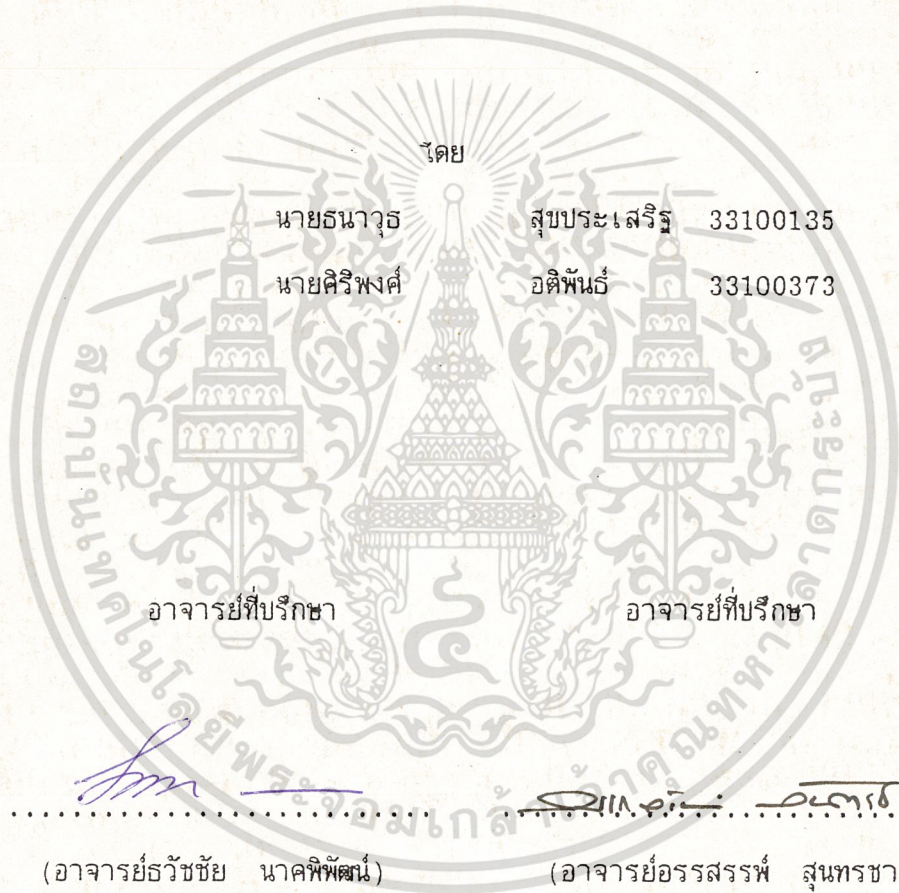
ปีการศึกษา 2536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

033159

ปีการศึกษา 2536

การสังเกตการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเกตการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ

ธนาวุธ สุขประเสริฐ

ศิริพงษ์ อติพันธ์

อาจารย์อวิชชัย นาคพิพัฒน์ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

อาจารย์อรรถสรทรัพย์ สุนทรชาติ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา 2536

บทคัดย่อ

การไหลของก๊าซในกระบอกสูบ มีอิทธิพลอย่างมากต่อการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ และได้มีการวิจัยลักษณะการไหลในกระบอกสูบด้วยวิธีต่างๆ แต่ส่วนใหญ่เป็นการมองจากด้านล่างหรือด้านบนของกระบอกสูบ ซึ่งไม่สามารถเห็นการหมุนในแนวตั้งได้ การวิจัยนี้ใช้วัสดุสีทากระบอกสูบ เพื่อสามารถสังเกตการไหลจากด้านข้างได้

การสังเกตการไหลใช้วิธีตามรอยอนุภาค (PTV, Particle Tracking velocity) โดยปล่อยอนุภาคเข้าไปในกระบอกสูบของเครื่องยนต์พร้อมกับอากาศในจังหวะดูด แล้วถ่ายภาพการไหลด้วยกล้องวิดีโอ และ วัดความเร็วอนุภาคด้วย Fiberoptic Laser velocimeter (FLV) นำภาพและความเร็วที่วัดได้มาวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flow Visualization in Four Stroke Engine

by Mr.Thanawut Sukprasert

Mr.Siripong Atipan

Asistant Professor Tawatchai Nakpipat (Adviser)

Asistant Professor Attasarn Suntornchat(Adviser)

Abatract

Gas flow in combustion chamber has been thought to be important factors which affect combustion phenomena in an engine.

Flow characteristic of gas during suction and compression stroke in the cylinder of four stroke engine have been measured through transparent cylinder with flow visualization technic such as particle tracking velocimetry method by means of video camera and fiberoptic laser velocimeter. Obtianed data were processed by personal computer and flow pattern of the gas were showed.

Effect of engine speed and intake port configuration on gas velocity swirl and tumble have been cleared.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| เรื่อง | หน้า |
|---|------|
| การเคลื่อนที่ของอนุภาคในกระบอกสูบ | 1 |
| การไหลในกระบอกสูบ | 1 |
| ความเร็วเฉลี่ยและลักษณะของ Turbulent Swirl | 4 |
| Squish | 11 |
| การทดลองเพื่อการศึกษาการไหลในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ | 28 |
| อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการประกอบชุดการทดลอง | 28 |
| วิธีทดลอง | 32 |
| ผลการทดลองสำหรับ flow visualization | 33 |
| วิเคราะห์ผลการทดลอง | 37 |
| วิเคราะห์ข้อผิดพลาดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น | 38 |
| บทสรุป | 39 |
| หนังสืออ้างอิง | 40 |

การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในกระบอกสูบ

การไหลของแก๊สในห้องเผาไหม้สำหรับเครื่องยนต์ เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีสำคัญยิ่งต่อกระบวนการเผาไหม้ ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และได้ประสิทธิภาพสูงสุดนั้น ส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับ การไหลของเชื้อเพลิงด้วย

ในการศึกษาลักษณะที่สำคัญของการไหลของแก๊สในกระบอกสูบ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญอันหนึ่งต่อกระบวนการเผาไหม้ การไหลแบบหมุนวนและการไหลแบบ Turbulent มีความสำคัญมากต่อการผสมของอากาศกับเชื้อเพลิง และจะมีผลต่อการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ การวิเคราะห์การไหลในกระบอกสูบจะพิจารณาตั้งแต่การไหลจากท่อไอดี ผ่านลิ้นไอดี เข้ามาในกระบอกสูบ จนกระทั่งสิ้นสุดจังหวะอัดของการทำงานของเครื่องยนต์

การไหลในจังหวะดูด

กระบวนการดูดอากาศในจังหวะดูดของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ จะมีอิทธิพลต่อการไหลในกระบอกสูบในช่วงแรกของจังหวะดูดเริ่มตั้งแต่การไหลผ่านลิ้นไอดีนั้น ช่วงที่เกิดลิ้นไอดี ที่เอียงหน้าตัดของการไหลจะมีขนาดเล็กที่สุด ทำให้ความเร็วของแก๊สที่หน้าตัดนี้มีค่าสูงสุด แก๊สที่ไหลผ่านวาล์ว เข้ามาในห้องเผาไหม้จึงมีลักษณะพุ่ง เป็นรูปกรวย และความเร็วของก๊าซในแนวแกนและแนวรัศมี มีค่าประมาณ ๑๐ เท่าของความเร็วลูกสูบในขณะนั้น ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงถึงความเร็วในแนวแกนและความเร็วในแนวรัศมี ซึ่งวัดในจังหวะดูดของเครื่องยนต์ว่าห้องที่มีกระบอกสูบสี่ และตำแหน่งวาล์วตั้งอยู่ตรงแกนกลางของกระบอกสูบ

ลักษณะของแก๊สที่พุ่ง เข้ามาในกระบอกสูบนั้น แสดงดังรูปที่ 2 จะเห็นว่าแก๊สที่พุ่ง เข้ามามีลักษณะเป็นรูปกรวย แก๊สที่พุ่ง เข้ามาในกระบอกสูบในจังหวะดูดจะไหลมากระทบกับผนังห้องเผาไหม้ เป็นผลทำให้เกิดการไหลหมุนวน เป็นวงขนาดใหญ่ในปริมาตรของกระบอกสูบ สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนจากภาพถ่ายดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นภาพที่แสดงถึงลักษณะสำคัญของการไหลของของไหลที่ถูกดูดเข้ามาในห้องเผาไหม้ ภาพที่แสดงให้เห็น เป็นภาพตัดในระนาบต่าง ๆ ระนาบหนึ่งในกระบอกสูบ ในขณะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ลงจะเกิดการไหลหมุนวนเป็นวงขนาดใหญ่ ซึ่งจุดศูนย์กลางของการไหลวนจะเคลื่อนที่ลงตามการเคลื่อนที่ของลูกสูบ และจะอยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างลูกสูบกับ Cylinder head ตลอด ส่วนบริเวณที่อยู่ตรงมุมของผนังเอกสาร์เป็นเอกสาร์ที่สว่นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยูดเห็นไปไซประยชน์ด้านการค้า ห้องเผาไหม้ จะเกิดการไหลหมุนวนเช่นกัน แต่มีขนาดเล็กกว่าและหมุนวนทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งการไม่มีการเคลื่อนที่ของแก๊สในอีกทิศทางนี้เกิดแต่ผลของแรงเฉื่อย และต้องอ้างอิงถึงเงาของเอกสาร์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

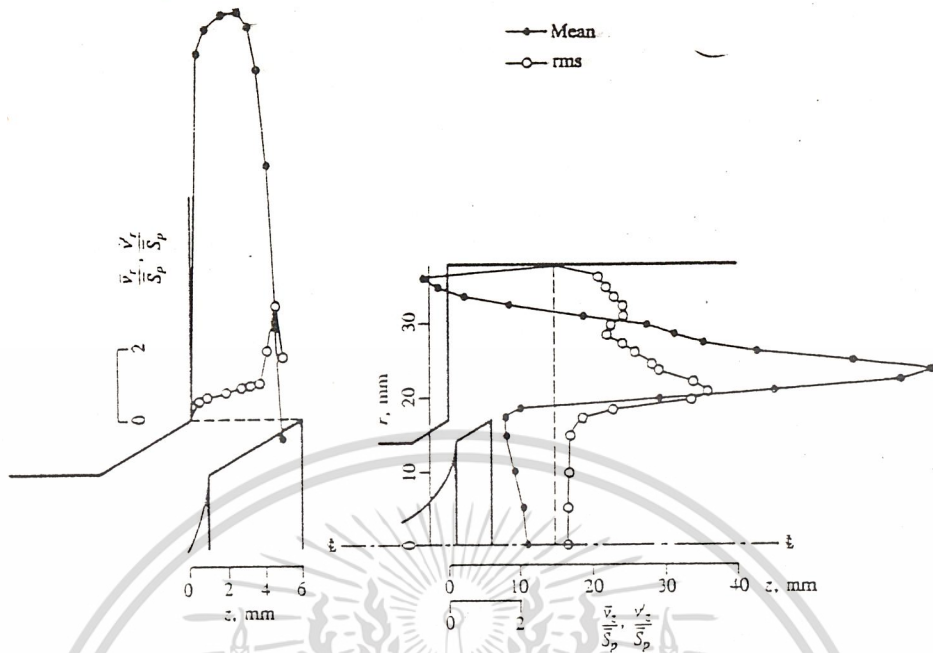


FIGURE 1 Radial mean velocity \bar{v}_r and root mean square (rms) velocity fluctuations v_r at the valve exit plane, and axial mean velocity \bar{v}_z and rms velocity fluctuation v_z 15 mm below the cylinder head, at 36° ATC in model engine operated at 200 rev/min. Valve lift = 6 mm. Velocities normalized by mean piston speed.¹

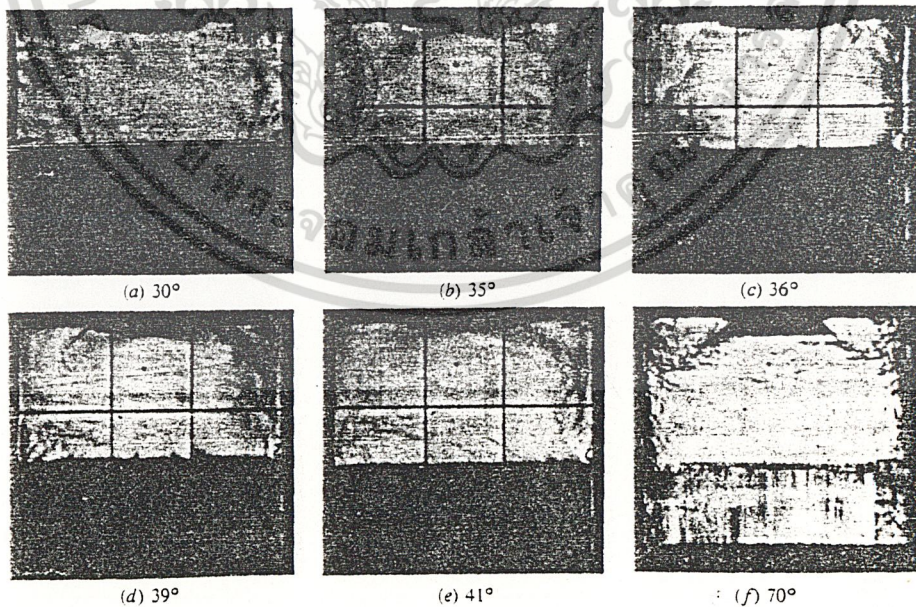


FIGURE 2 Sequence of schlieren photographs of intake jet as it develops during intake stroke. Numbers are crank angle degrees after TC.²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลหมุนวนนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิด Shear layer ในขณะที่ของไหลพุ่งเข้ามาในห้องเผาไหม้ ด้วยความเร็วที่สูงมาก

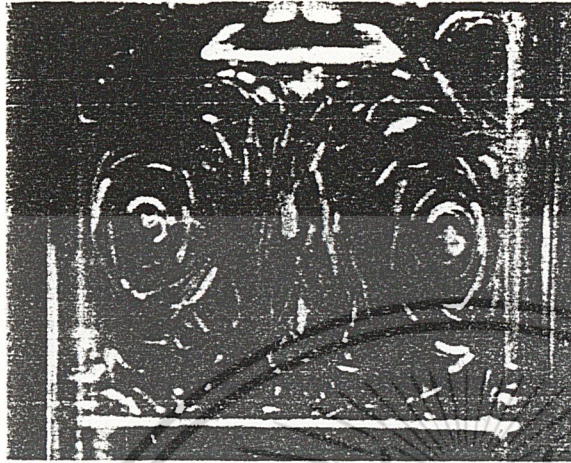


FIGURE 3
Large-scale rotating flow pattern set up within the cylinder by the intake jet. Photograph of streak lines in water flow into model engine with axisymmetric valve.³

เครื่องยนต์โดยทั่วไป ตำแหน่งของวาล์วจะไม่อยู่ตรงแกนกลางของกระบอกสูบ แต่จะอยู่ชิดกับผนังห้องเผาไหม้ด้านใดด้านหนึ่ง การไหลของแก๊สจึงมีความซับซ้อนขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การไหลหมุนวนเป็นวงขนาดใหญ่ก็ยังคงเกิดขึ้นอยู่ รูปที่ 4-a แสดงถึงการไหลของของไหลในเครื่องยนต์ที่ติดตั้งวาล์วไอเสียในตำแหน่งที่ไม่อยู่ตรงแกนกลางกระบอกสูบ ซึ่งในช่วงแรกของจังหวะดูด รูปแบบการไหลของของไหลยังคงคล้าย ๆ กับการไหลในรูปที่ 3 เนื่องจากการไหลหมุนวนยังคงเกิดขึ้น แต่จะวนในลักษณะที่ระนาบของการไหลวนเอียงทำมุมกับแกนของกระบอกสูบ รูปที่ 4-b แสดงการไหลที่ดัง เกิดในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามมาตรฐานเครื่องยนต์ทั่วไป โดยใช้หัวเป็นของไหล ดังเกิดในระนาบ ๓๐ มม. จาก Cylinder head การไหลในระนาบนี้ยังคงมีลักษณะเป็น Vortex คู่ ซึ่งทิศทางการไหลของ Vortex ทั้งสองมีทิศตรงข้ามกัน รูปแบบการไหลนี้เกิดขึ้นเนื่องจากผนังของห้องเผาไหม้ที่อยู่ชิดกับวาล์วไอเสียเป็นสิ่งกีดขวางอันหนึ่งที่ยึดต้านการไหลของของไหล เมื่อของไหลพุ่งออกมาจากวาล์วไอเสียจะกระทบกับผนังห้องเผาไหม้ที่อยู่ใกล้ที่สุดก่อน ทำให้ของไหลไหลวนออกมาทางด้านข้างทั้งสองข้าง เป็นผลให้เกิด Vortex ทั้งสอง

ที่กล่าวมานี้เป็นลักษณะกว้าง ๆ ของการไหลในห้องเผาไหม้ในจังหวะดูด คือ การไหลเข้ามาในห้องเผาไหม้ด้วยความเร็วสูงของแก๊ส การกระทบกับผนังห้องเผาไหม้ และการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ทำให้เกิดการไหลหมุนวนในกระบอกสูบ ซึ่งรายละเอียดลักษณะการไหลจะเป็นอย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ออกแบบ เช่น ทิศของแกนวาล์ว ตำแหน่งของวาล์ว และลักษณะของ Cylinder head เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

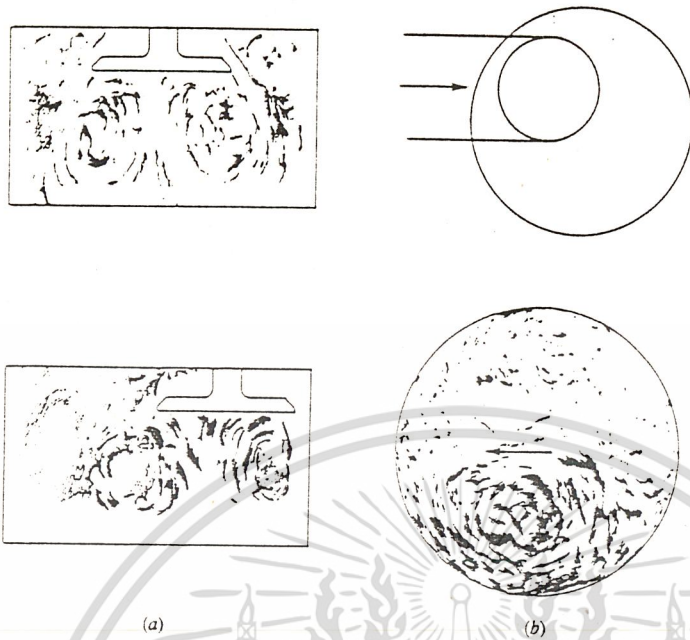


FIGURE 4
 Sketches from: (a) streak photographs of in-cylinder intake generated flow in water analog of intake process in model engine with offset inlet valve, at 90° ATC; (b) streak photographs of flow in diametral plane; 30 mm below cylinder head, with intake port and valve geometry shown, with steady water flow into cylinder. Valve lift = 4 mm.*

ความเร็วเฉลี่ยและลักษณะของ TURBULENT

การไหลแบบ Turbulent ในกระบอกสูบเป็นผลจาก fluctuation ในการไหล (การสั่นของ รัศมีเลกดูในการไหล ทำให้ความเร็วของการไหลมีลักษณะสูง ๆ ต่ำ ๆ มีลักษณะเป็นการไหลแปรปรวน) ซึ่ง fluctuation จะทำให้การถ่ายเทโมเมนตัม การถ่ายเทความร้อน และการแพร่กระจายของ รัศมีเลกดูมีอัตราที่สูงขึ้น การไหลแบบ turbulent จึงทำให้อัตราการผสมอากาศกับเชื้อเพลิงดีขึ้น เป็น ผลที่ประสิทธิภาพของการเผาไหม้สูงขึ้นด้วย Viscous shear stress เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการ ถ่ายเทพลังงานของไหล และทำให้พลังงานภายในของของไหลเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ทำให้เกิดการไหลแบบ Turbulent แลพลังงานสำหรับการเกิด Turbulent คือแรงเสียดทานความเร็วเฉลี่ย

Turbulent เป็นทั้งการไหลแบบหมุนวน และการไหลแบบ ความเร็วแกว่ง fluctuation) ลักษณะของการไหลแบบ Turbulent จะขึ้นกับสภาพแวดล้อมในห้องเผาไหม้ การไหลจะมีความเกี่ยว ข้องกับ Turbulent shear layer, recirculating region และ Boundary layer การ ไหลของแก๊สในห้องเผาไหม้จะไม่คงที่ และจะแสดงลักษณะของ fluctuation ในแต่ละรอบการทำงาน

ของเครื่องยนต์ ทั้งลักษณะทั่วไปและรายละเอียดของการไหลแบบ turbulent ต่างก็เป็น factor ที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สำคัญต่อพฤติกรรมของการไหล ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะที่สำคัญของ Turbulent คือความไม่เป็นรูปแบบหรือการไหลแบบ Random ดังนั้นวิธีทางสถิติจึงเป็นวิธีที่ใช้ในการหาปริมาณต่าง ๆ เกี่ยวกับการไหล ในการไหลแบบ Turbulent ที่ Steady State ความเร็วขณะใดขณะหนึ่งของของไหล U สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \tag{1}$$

สำหรับ Steady Flow \bar{U} คือ ความเร็วเฉลี่ย เท่ากับ ค่าเฉลี่ยของ $U(t)$

$$\bar{U} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} U(t) dt \tag{2}$$

turbulent intensity u' คือ root mean square ของ u

$$u' = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} u^2 dt \right)^{1/2} \tag{3a}$$

หรือ

$$u' = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} (U^2 - \bar{U}^2) dt \right] \tag{3b}$$

เนื่องจากค่าเฉลี่ยของ $u\bar{U} = 0$

ในแต่ละ cycle ของการทำงานของเครื่องยนต์ ลักษณะทั่วไปของการไหลยังคงเหมือนเดิม แต่รายละเอียดของการไหลจะเปลี่ยนไป เนื่องจากความเร็วเฉลี่ยของการไหลในแต่ละ Cycle ไม่เท่ากัน ดังนั้น เพื่อที่จะได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด จึงควรทำการวัดค่าต่าง ๆ ในหลาย ๆ Cycle ของการทำงานของเครื่องยนต์ และค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมดเรียกว่า Ensemble averaged data ความเร็วขณะใดขณะหนึ่งที่ Crank angle θ ใน Cycle ที่ i สามารถเขียนได้ดังนี้

$$U(\theta, i) = \bar{U}(\theta, i) + u(\theta, i) \tag{4}$$

Ensemble averaged velocity $\bar{U}_{EA}(\theta)$ หาได้ดังสมการ

$$\bar{U}_{EA}(\theta) = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} U(\theta, i) \tag{5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ N_c คือ จำนวน cycle สำหรับการวัดข้อมูลทั้งหมด

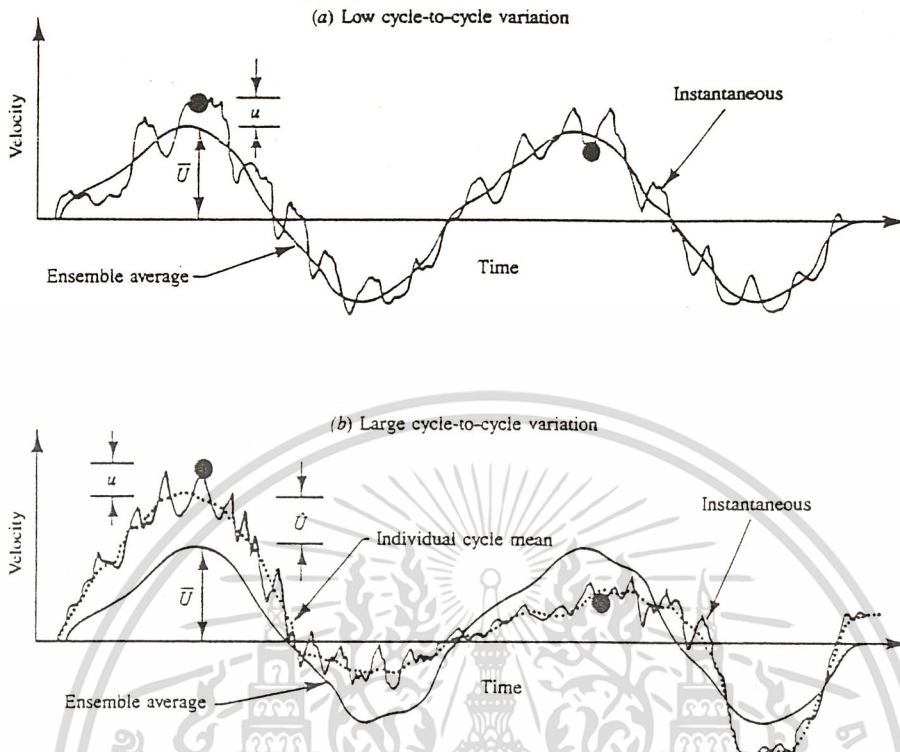


FIGURE 5 Schematic of velocity variation with crank angle at a fixed location in the cylinder during two consecutive cycles of an engine. Dots indicate measurements of instantaneous velocity at the same crank angle. Ensemble- or phase-averaged velocity obtained by averaging over a large number of such measurements shown as solid smooth line. Top graph: low cycle-to-cycle flow variations. Here the individual-cycle mean velocity and ensemble-averaged velocity are closely comparable. Bottom graph: large cycle-to-cycle variations. Here the individual-cycle mean velocity (dotted line) is different from the ensemble-averaged mean by \bar{U} . The turbulent fluctuation u is then defined in relation to the individual-cycle mean.⁵

การประยุกต์ใช้งานของ Engine velocity data

ตามที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้น ในการสังเกตการไหลจะเป็นจะต้องวิเคราะห์ความเร็วในแต่ละ cycle รวมทั้งการใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด ensemble-averaged velocity \bar{U}_{EA} กำหนดโดย สมการ

$$\bar{U}_{EA} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} U(\theta, i) \quad (6)$$

และ ensemble-average fluctuation intensity หาได้จาก สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีแปลงเนื้อหา $u'_{r,EA}(\theta) = \left\{ \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} [u(\theta, i)]^2 \right\}^{1/2}$ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (7)

สมการทั้งสองนี้จำเป็นต้องใช้ค่า U และ u ที่แต่ละ crack angle ในการพิจารณา วิธีการวัดความเร็วที่วิธีหนึ่ง คือ laser doppler anemometry (LDA) เป็นการใช้ลำแสง laser 2 ลำแสงตัดกันที่ปริมาตรเล็ก ๆ ปริมาตรหนึ่ง เมื่ออนุภาคเล็ก ๆ ผ่านปริมาตรนี้มันจะกระจายแสงที่ความถี่หนึ่งขึ้นกับความเร็วของอนุภาค อนุภาคที่ซ่อนเข้าไปนั้นจะต้องเล็กพอที่จะไหลโดยปราศจากการ slip ด้วยงานจะเกิดขึ้นเมื่อ อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านจุดที่ทำการวัดเท่านั้น ดังนั้น ข้อมูลที่วัดได้ข้อมูลหนึ่งจึงเป็นความเร็วที่อยู่ระหว่าง Crank angle คู่หนึ่ง θ ที่มีความกว้างเท่ากับ $\Delta\theta$ และมีจุดกึ่งกลางความกว้างมุมที่ $\bar{\theta}$ เรียกว่า specific crank angle ฉะนั้นในการหา ensemble-averaged specific velocity จึงครอบคลุมอยู่ที่ช่วง Crank angle หนึ่ง ๆ ที่มีความกว้างเท่ากับ $\Delta\theta$ ที่ specific crank angle $\bar{\theta}$ สมการ ensemble-averaged velocity จึงแสดงดังนี้

$$\bar{U}_{EA}(\bar{\theta}) = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_i} U_{i,j}(\bar{\theta} \pm \frac{\Delta\theta}{2}) \quad (8)$$

เมื่อ N_i คือ จำนวนข้อมูลที่ถูกบันทึกใน windows ระหว่าง cycle ที่ i

N_c คือ จำนวน cycle

N_t คือ จำนวนข้อมูลที่ทำการวัด

เช่นเดียวกันเดียวกับ ensemble root mean square velocity fluctuation คือ

$$u_{F,EA}(\bar{\theta}) = \left\{ \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_i} [u_{i,j}(\bar{\theta} \pm \frac{\Delta\theta}{2})]^2 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

ซึ่ง

$$u_{i,j} = U_{i,j} - \bar{U}_{EA} \quad (10)$$

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงขอบเขตการไหลอย่างสมบูรณ์แบบ จึงจำเป็นที่จะต้องหาความเร็วเฉลี่ยและความเร็ว fluctuation ในแต่ละ cycle ส่วนที่สำคัญที่สุดของกระบวนการนี้ คือ การกำหนดความเร็วเฉลี่ยที่ specific crank angle ในแต่ละ cycle วิธีต่าง ๆ ที่ได้ถูกนำมาใช้ในการหาความเร็วเฉลี่ย ในแต่ละ cycle ยกตัวอย่างเช่น การ move window , low pass filter และ smoothing เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์ความเร็วในแต่ละ cycle ขึ้นแรกจะต้องหา mean velocity และ ค่าเฉลี่ย ensemble ของความเร็วเฉลี่ยคือ

$$\bar{U}_{EA}(\bar{\theta}) = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \bar{U}(\bar{\theta} \pm \frac{\Delta\theta}{2}, i) \quad (11)$$

ซึ่งสมการนี้เหมือนกับค่าเฉลี่ย ensemble ตามสมการที่ 8 root mean square fluctuation mean velocity ในแต่ละ cycle สามารถหาได้จาก

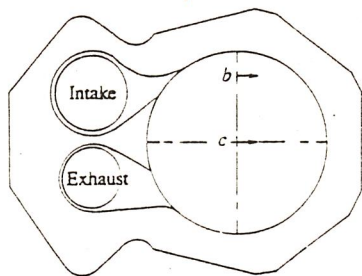
$$U_{rms}(\bar{\theta}) = \left\{ \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} [\bar{U}(\bar{\theta} \pm \frac{\Delta\theta}{2}, i) - \bar{U}_{EA}(\bar{\theta})]^2 \right\}^{1/2} \quad (12)$$

สมการนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของ fluctuation ของอัตราหนึ่งในความเร็วเฉลี่ย ในช่วงความกว้าง crank angle $\Delta\theta$ ที่ specific crank angle $\bar{\theta}$ หาได้จาก สมการที่ 4 เนื่องจาก ความเร็ว fluctuation ของอัตราหนึ่งใน ไม่คงที่ในแต่ละ cycle และจำนวนข้อมูลมีเพียงพอที่จะเชื่อถือได้ จึงต้องทำการเฉลี่ยค่าความเร็ว

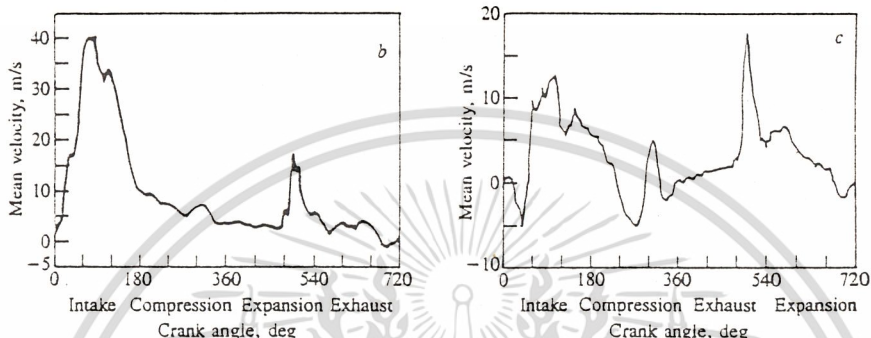
$$u'_{T,EA}(\bar{\theta}) = \left\{ \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} [U(\bar{\theta} \pm \frac{\Delta\theta}{2}, i) - \bar{U}(\bar{\theta} \pm \frac{\Delta\theta}{2}, i)]^2 \right\}^{1/2} \quad (13)$$

ค่า $u'_{T,EA}$ คือ ensemble-averaged turbulence intensity เกิดแตกต่างจากการวัดความเร็วของก๊าซในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ เทคนิคหนึ่งที่ใช้ข้อมูลสมบูรณและแม่นยำ คือ Laser doppler anemometry ผลของการทดสอบด้วยเทคนิคนี้ แสดงให้เห็นถึงลักษณะสำคัญของการไหลของก๊าซในกระบอกสูบ ข้อมูลที่นำมาได้จะต้องนำมาวิเคราะห์ด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากข้อมูลนี้ได้จากเครื่องยนต์ที่ออกแบบมาพิเศษ ซึ่งรูปร่างและของไหลได้ถูกดัดแปลงเพื่อทำการทดลองและการอธิบายที่ง่ายด้วย การไหลในกระบอกสูบเป็นสามมิติจึงจำเป็นต้องทำการวัดการไหลหลาย ๆ จุดในกระบอกสูบ และใช้เทคนิค flow visualization ในการแสดงลักษณะการไหลได้อย่างเพียงพอ รูปที่ 6 แสดงถึงความเร็วเฉลี่ย ensemble ตลอด engine cycle ที่ตำแหน่งการวัด 2 ตำแหน่งในเครื่องยนต์ L HEAD ซึ่งออกแบบทำให้เกิดการไหลแบบ swirl (การไหลหมุนวนในแนวแกน)

รูปที่ 6-b แสดงความเร็วเฉลี่ยในส่วนของการไหลหมุนวนใน clearance volume ตามทิศทางของ swirl ในจังหวะดูดจะเกิดความเร็วสูงและสูงขึ้นไปจนถึง maximum และความเร็วจะลดลงเรื่อย ๆ ในจังหวะอัด ความเร็วของการไหลในจังหวะดูด และ จังหวะอัดที่ทำการวัดจากเครื่องยนต์ทดลอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สามารถนำมาผสมรวมกับความเร็วจากรูปร่างเครื่องยนต์จริง แต่ความเร็วในจังหวะขยาย และจังหวะไกววอร์คแตกต่างกันอีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาขอไปใช้



(a)



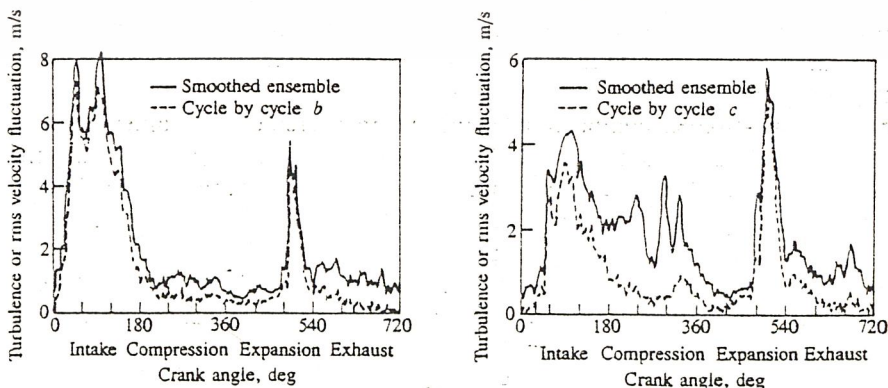
(b)

(c)

FIGURE 6 Ensemble-averaged velocities throughout the engine cycle in motored four-stroke L-head engine: 300 rev/min, mean piston speed 0.76 m/s. (a) Engine schematic showing measurement locations and velocity directions; (b) velocity at b in intake flow path; (c) velocity at c on cylinder axis.

คล้ายกันพวกนี้รอบๆขอบเขตนี้... อย่างนี้ที่ตาม รูปที่ 6-2... clearance volume... cylinder axis... nonhomogeneous

รูปที่ 7 แสดงถึงการแกว่งของความเร็วเฉลี่ย rms และ ensemble averaged turbulence intensity... cycle โดยวัดที่ตำแหน่งเดียวกับกับรูปที่ 6



(a)

(b)

FIGURE 7 Ensemble-averaged rms velocity fluctuation and ensemble-averaged individual-cycle turbulence intensity as a function of crank angle: (a) at location b in Fig. 8-8a; (b) at location c in Fig. 8-8a.

ความแตกต่างระหว่าง 2 เส้นโค้งในแต่ละกราฟ คือ การแปรผัน cycle-by-cycle ในการไหลเฉลี่ย จากรูปจะเห็นว่าในระหว่างกระบวนการดูด การแปรผัน cycle-by-cycle ในการไหลเฉลี่ยนั้นมีส่วนน้อยเมื่อเทียบกับระดับ turbulence ที่มีค่าสูง ในระหว่างจังหวะอัด การแปรผัน cycle-by-cycle ในความเร็วเฉลี่ยมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับ ensemble-averaged turbulence intensity

การไหลผ่านวาล์วไอที่ตอบสนองต่อลักษณะต่างๆของการไหลในกระบอกสูบ ความเร็วของการไหลผ่านวาล์วขึ้นกับความเร็วของลูกสูบ ดังนั้น ความเร็วของการไหลในกระบอกสูบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่าง ๆ จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วลูกสูบ รูปที่ 8 แสดง ensemble-averaged mean และ rms velocity ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่าง ๆ กัน โดยวัดที่ตำแหน่งวาล์วไอที่ ซึ่งเป็น การไหลแบบ swirl (ที่จุด b ในรูปที่ 8-a) จะเห็นว่ากราฟทุกเส้นโดยประมาณมีรูปร่างเหมือนกัน แต่สัดส่วนความเร็วต่างกัน

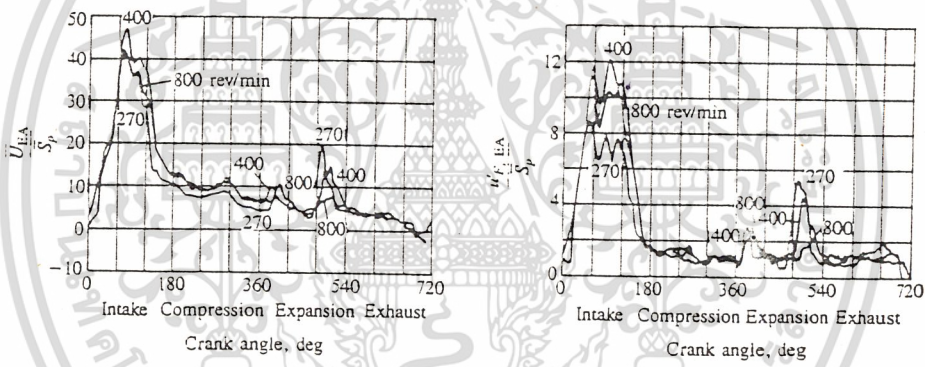


FIGURE 8 Ensemble-averaged mean and rms velocity fluctuations, normalized by mean piston speed, throughout the engine cycle for three engine speeds. Location b in Fig. 8-a.¹¹

รูปที่ 9 แสดง turbulence intensity, $u_{T,EA}$ และ ensemble averaged rms fluctuation velocity สำหรับรูปร่างห้องเผาไหม้และลักษณะการไหลแบบต่างๆ ซึ่งวัด ณ ตำแหน่งบริเวณ TC ที่ช่วงปลายของจังหวะอัด กราฟแสดงที่ความเร็วเฉลี่ยต่าง ๆ

ในระหว่างจังหวะอัดและจังหวะเผาไหม้ ขณะที่ความดันในกระบอกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่วนผลที่ยังไม่เผาไหม้ได้ถูกอัด คุณสมบัติการไหลแบบ turbulent ถูกเปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็วในจังหวะอัด การอัดอย่างรวดเร็วจะนำมาซึ่งการเพิ่ม vortex และ turbulent intensity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

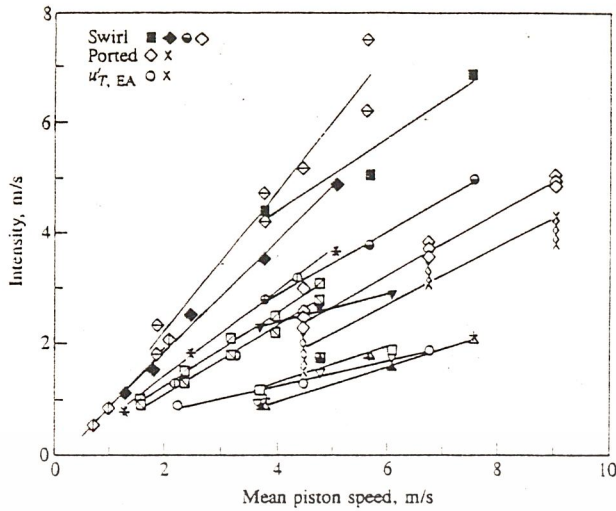


FIGURE 9 Individual-cycle turbulence intensity $u_{T,EA}$ (OX) and ensemble-averaged rms fluctuation velocity (remaining symbols) at TC at the end of compression, for a number of different flow configurations and chamber geometries as a function of mean piston speed.¹⁶ Two data sets for two-stroke ported engines. Four data sets with intake generated swirl.

SWIRL

Swirl เป็นการหมุนของอนุภาคภายในกระบอกสูบ ซึ่งเกิดขึ้นโดยอนุภาคที่ไหลเข้าไปในกระบอกสูบด้วยโมเมนตัมเชิงมุมค่าหนึ่ง ในขณะที่การสลายของ swirl มีสาเหตุจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างรอบการทำงานของเครื่องยนต์ แต่การดูดแก๊สเข้ามาในจังหวะดูดทำให้เกิด swirl สามารถคงอยู่ได้ตลอดช่วงกระบวนการอัด การเผาไหม้ และการขยาย ในเครื่องยนต์ที่มีการออกแบบห้องเผาไหม้เพื่อการไหลที่เหมาะสม การไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นในจังหวะดูดจะมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากในช่วงการอัด Swirl จะถูกใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล และในเครื่องยนต์หัวฉีดบางประเภทเพื่อการผสมอากาศกับเชื้อเพลิงที่ดี นอกจากนี้ Swirl ยังมีส่วนช่วยในการไล่ไอเสียออกจากตัวเครื่องยนต์ได้อีกด้วย ในการออกแบบเครื่องยนต์บางประเภท มีการออกแบบให้มีห้องเผาไหม้แบบ prechamber ทั้งนี้เพื่อการเกิด swirl ซึ่งในเครื่องยนต์แบบนี้ Swirl มีความสำคัญอย่างมากที่จะช่วยในการทำงานในจังหวะอัด

Swirl Measurement

โดยธรรมชาติของการไหลแบบ Swirl ภายในกระบวนการทำงานของเครื่องยนต์นี้ จะทำการวัดค่าได้ยากมากดังนั้นจึงใช้การทดสอบด้วยการวัดการไหลแบบปกติ ซึ่งจะถือว่าเป็นคุณสมบัติของ swirl ด้วย อากาศจะไหลผ่านทางเข้าท่อไอดี แล้วผ่านไปยังวาล์วไอดีที่ตำแหน่งด้านบนของตัวกระบอกสูบในอัตราที่เหมาะสม วิธีที่ง่ายที่สุดที่จะวัดและศึกษาพฤติกรรมของ Swirl ภายในกระบอกสูบ คือ การใช้ตัว paddle wheel ซึ่งจะมีแกนภายในกระบอกสูบ (แรงเสียดทานน้อย) โดย paddle wheel จะอยู่ด้านล่างของกระบอกสูบ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 10 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่าศูนย์กลางของ Paddle wheel จะมีค่าใกล้เคียงกับกระบอกสูบ และวัดอัตราการหมุนของ paddle wheel โดยจะถือว่าเป็นการวัดการ Swirl ของอากาศด้วย เมื่อการวัดอัตราการหมุนของ paddle wheel ถูกออกแบบเพื่อใช้หารายละเอียดของการ swirl ของอากาศ ทำให้เกิดการพัฒนารูปแบบขึ้นมาเป็น impulse swirl meter โดยที่ paddle wheel จะเป็นตัวทำให้เกิดการ Swirl อย่างมีรูปแบบ ค่า Torque ที่วัดได้จะใช้อธิบาย Swirl ซึ่ง torque ที่ได้จะมีค่าเท่ากับค่าโมเมนตัมเชิงมุมที่ผ่านในระนาบที่ไหลอย่างมีรูปแบบ ค่า Swirl Coefficient มีความสำคัญในการเปรียบเทียบการไหลด้วยโมเมนตัมเชิงมุม กับ การไหลตามแกน

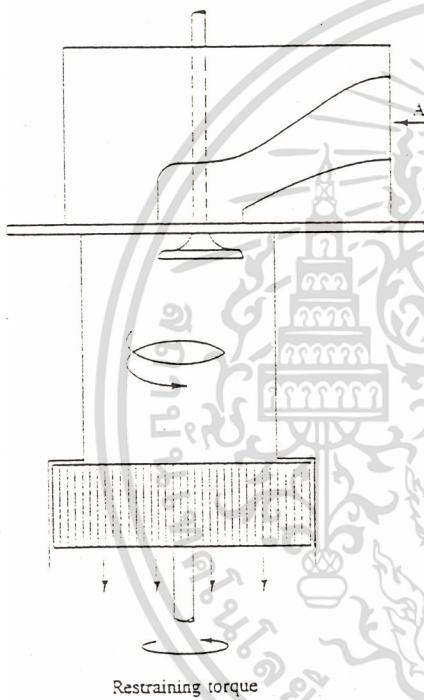


FIGURE 10
Schematic of steady-flow impulse torque swirl meter.²²

$$C_s = \frac{W_p B}{v_o} \quad (14)$$

W_p คือ ความเร็วเชิงมุมของ Paddle Wheel = $(2 N_p)$

N_p คือ ความเร็วของการหมุน ,

B คือ Characteristic Dimension

v_o คือ ความเร็วเฉพา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_0 = \frac{[2(P_0 - P_c)]^{1/2}}{\rho} \tag{15}$$

ดังนั้นจึงมีการนำเอา Torque meter มาใช้ในการวัดค่าความเร็วเฉพาะ ค่าตัวแปรต่าง ๆ จะหาได้จากสมการที่ได้กล่าวไว้แล้ว ส่วนสมการที่สมบูรณ์จะได้ว่า

$$C_s = \frac{8T}{\dot{m} v_0 B} \tag{16}$$

T คือ ค่า Torque

\dot{m} : air mass flow rate

ซึ่งค่า v_0 จะสามารถหาได้จากสมการที่ได้กล่าวไว้แล้ว และค่าความกว้างของกระบอกสูบจะถูกใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของมิติ (dimensionless-coefficient) จากสมการจะได้ว่า ค่า Paddle wheel speed (w_p) ถือว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการหมุนวน (Swirl coefficient) จากการทดลอง เนื่องจากการหมุนวนไม่ได้เป็นการหมุนวนของ Solid body และ ค่า Paddle Wheel ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นหลังการหมุนวน ดังนั้นค่า Impulse torque meter จะมีค่าสูงกว่า Swirl-Coefficient ในการวัดค่า Swirl ในเครื่องยนต์จะมีการใช้ค่า Swirl ratio ในการหาค่าต่างๆ ซึ่งจะหาได้จากการใช้ค่าของความเร็วเชิงมุมของการไหล (w_s) ซึ่งมีค่าเท่ากับโมเมนตัมเชิงมุมด้วย จะได้ว่า

$$R_s = \frac{w_s}{\omega} \tag{17}$$

ขณะที่เกิดการดูดน้ำมันจากของเครื่องยนต์ วาล์วไอดีจะถูกกระดกให้เปิดขึ้น และมีการไหลพุ่งของไอดีเป็นผลทำให้เกิดโมเมนตัมเชิงมุมขึ้นภายในกระบอกสูบ ซึ่งจะมีค่าแปรผันตามมุมของข้อเหวี่ยง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ ในกระบวนการดูดไอดีนั้นจะทำให้เกิดโมเมนตัมภายใต้เงื่อนไขของการไหลและการปิด-เปิดของวาล์วในไมวาล์วกันใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบอกสูบ และค่าที่วัดได้จาก Impulse torque meter จะถูกใช้ในการประมาณค่าของ Swirl สมมุติให้ว่าส่วมีลักษณะคุณสมบัติภายใต้เงื่อนไขของ transient เพื่อให้เกิดการไหลอย่างคงที่ ค่าความเร็วเชิงมุม ω_s ที่จุดสุดท้ายของกระบวนการจะถูกหาได้จากสมการ

$$\omega_s = \frac{g \int_{\theta_1}^{\theta_2} T d\theta}{I \int_{\theta_1}^{\theta_2} m d\theta} \quad (18)$$

θ_1 และ θ_2 คือ มุมของข้อเหวี่ยงในจังหวะเริ่มต้นและสุดท้ายในขั้นตอนการดูด ค่า T และ m จะวัดในขณะที่วาล์วเปิด ซึ่งจะขึ้นกับมุมของข้อเหวี่ยง สมมุติให้ V_0 และ ρ คงที่ในขณะจังหวะดูด ดังนั้นจะได้ว่า

$$R_s = \frac{\omega_s}{2\pi N} = \frac{1}{\eta_v BL} \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} (A_v C_d) C_s d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} A_v C_d d\theta} \quad (19)$$

$A C_d$ คือ effective value ที่แต่ละมุมของข้อเหวี่ยง จากสมการพบว่า η_v ที่ำจะให้ R_s ที่ไม่ขึ้นกับเงื่อนไขต่าง ๆ ในการทดสอบเครื่องยนต์

ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบที่สภาวะคงที่กับการใช้งานจริงของเครื่องยนต์ จะพบว่ารูปแบบของการ Swirl จะไม่ค่อยคงที่ ดังนั้นจึงใช้ลักษณะของการ Swirl จากการทดสอบมาใช้อธิบายลักษณะคุณสมบัติต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม Swirl ที่เกิดในจังหวะดูดอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปในจังหวะอัดได้

การเกิด Swirl ในจังหวะดูด

ปัจจัยสองประการที่ทำให้เกิดการ Swirl ในจังหวะดูดคือ ประการแรก ของไหลที่ไหลเข้าสู่กระบอกสูบจะชนผนังห้องเผาไหม้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางของการเคลื่อนที่ เป็นผลให้เกิดการไหลวนแบบ Swirl ขึ้น อีกประการหนึ่งก็คือ การไหลวนที่มีขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นที่ทางเข้าท่อไอดี แล้วเกิดการไหลวนตามแนวของแกนวาล์วก่อนที่จะเข้ามายังกระบอกสูบ รูปแบบหรือชนิดของการไหลที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับการกระจายของของไหลภายในเส้นรอบวงของวาล์วไอดี ดังนั้น การไหลของของไหลที่ท่อไอดี จึงเป็นปัจจัยหลักในการคิดโมเมนต์เชิงมุมรวมภายในแกนของกระบอกสูบ

ท่อทางเข้าแบบโดยตรงและท่อทางเข้าแบบเฉียงแบบที่แสดงในรูปที่ 11 คือ แบบที่ใช้อธิบายผลต่าง ๆ โดยที่ท่อทางเข้าแบบโดยตรงจะนำของไหลไหลผ่านวาล์ว ไอดีที่กำลังเปิดอยู่ โดยไหลในทิศทางเดียวกับเส้นสัมผัสเส้นรอบวงรับส่วนท่อทางเข้าแบบเฉียง นั้นจะนำของไหลไหลเข้าได้ดีกว่ากัน โดยจะไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลผ่านเข้าไปในขณะที่วาล์วเปิดในทิศทางสัมผัสกับเส้นรอบวง ในการเลือกใช้ท่อทางเข้าในแต่ละแบบ จะกำหนดให้พื้นที่ท่อทางเข้าถูกจำกัดด้วย

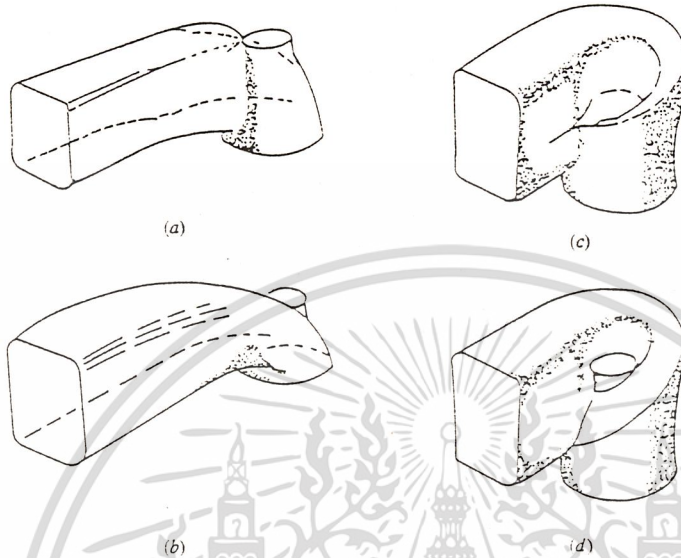


FIGURE 11
Different types of swirl-generating inlet ports: (a) deflector wall; (b) directed; (c) shallow ramp helical; (d) steep ramp helical.²⁴

ในการศึกษาการไหลภายในกระบอกสูบอาจใช้วาล์วไอตีแบบ Masking off หรือ แบบ Shrouding ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 12 ซึ่งวาล์วทั้งสองชนิดนี้เป็นที่นิยมมาใช้ในการวิจัยเกี่ยวกับเครื่องยนต์ เนื่องจากการแก้ไขต่าง ๆ สามารถทำได้ง่าย ซึ่งงานเครื่องยนต์ทั่วไปต้องคำนึงถึงราคา น้ำหนัก และ ปัญหาเรื่องการเสียรูป หรือปัญหาเรื่องการป้องกันการหมุนของวาล์ว ข้อสำคัญที่สุดที่เลือกใช้วาล์วแบบ Masking off ซึ่งเป็นวาล์วไอตีของเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด โดยออกแบบมาเพื่อให้เกิดมีการไหลแบบ Swirl ท่อทางเข้าของไอตีก็มีส่วนช่วยในการไหลแบบ Swirl เช่น รูปร่างของแกนวาล์วและ ลักษณะของการไหลก่อนที่จะผ่านวาล์วเข้าไปยังกระบอกสูบ ดังตัวอย่างที่แสดง คือท่อทางเข้าแบบกั้นหอย ที่แสดงในรูปที่ 11 ท่อทางเข้าแบบนี้จะทำให้สัมประสิทธิ์การไหลมีค่าสูงกว่าการไหลในระดับเดียวกัน โดยการนำประโยชน์จากพื้นที่ที่วาล์วเปิดอย่างเต็มที่ จะมีผลให้ประสิทธิภาพของปริมาตรมีค่าสูงขึ้น รูปที่ 13 เป็นการเปรียบเทียบค่าการ Swirl ที่ Steady state โดยการนำท่อทางเข้าแบบต่าง ๆ ในรูปที่ 11 จะพบว่า การ Swirl จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อวาล์วเปิดมากขึ้น การชนหรือการกระแทกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า กับท่อทางเข้ามากขึ้น ทำให้รูปแบบของการไหลถูกจำกัดลงในระหว่างที่วาล์วเปิดกับวาล์วปิด นอกจากนี้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

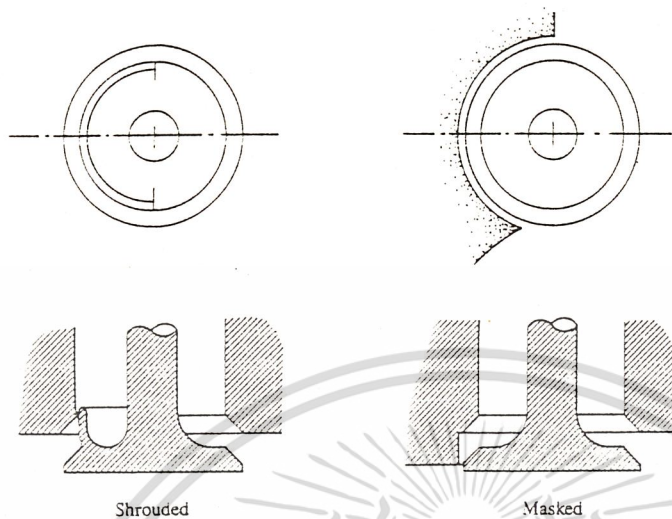


FIGURE 12 Shrouded inlet valve and masked cylinder head approaches for producing net in-cylinder angular momentum.

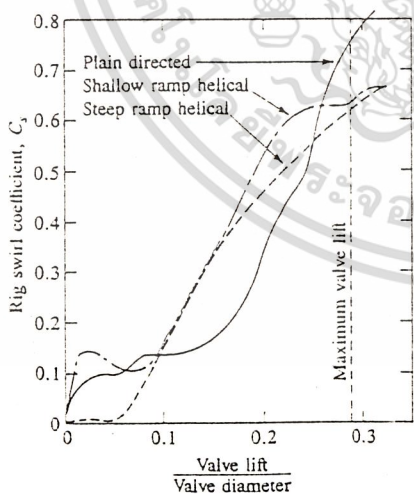


FIGURE 13 Steady-state torque meter swirl measurements of directed, shallow ramp, and steep ramp helical ports as a function of inlet valve lift/diameter ratio.²³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อทางเข้าแบบกั้นหอยยังให้ค่าโมเมนตัมเชิงมุมสูงกว่าท่อทางเข้าแบบโดยตรงอีกด้วย

ค่า Swirl ratio สำหรับท่อทางเข้าแบบนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 16 และ 19 ซึ่งท่อทางเข้าแบบโดยตรงจะมีค่า 2.5 และท่อทางเข้าแบบ Shallow ramp helical จะมีค่า 2.9 ส่วนท่อทางเข้าแบบ Step ramp helical จะมีค่า 2.6 การใช้ Swirl meter วัดค่า Ratio จะให้ค่าประมาณไม่เกิน 30 % เช่น การใช้ Impulse-swirl-meter วัดค่า Swirl ratio โดยการให้การหมุนของอนุภาคของแข็ง (Solid body) จะให้ค่า 20 % ซึ่งจะเท่ากับค่าโมเมนตัมเชิงมุมของการดูดไอดีเข้ากระบอกสูบที่ได้โดยการวัดความเร็วที่ทามุมสัมผัสกับกระบอกสูบ โดยการใช้ท่อทางเข้าแบบเดียวกัน โดยวัดที่จุดสิ้นสุดของขั้นตอนการดูด

ท่อทางเข้าแบบโดยตรง และท่อทางเข้าแบบเฉียงเบน และวาล์วไอดีแบบ mask เป็นการออกแบบให้การไหลทามุมเข้าไปยังกระบอกสูบ โดยการไหลนั้นเป็นการไหลที่ไม่มีรูปแบบ ผ่านเส้นรอบวงของวาล์ว มีผลให้การไหลที่จะผ่านเข้าไปในกระบอกสูบมีความเร็ว v_{θ} ซึ่งมีทิศทางเดียวกับแกนกระบอกสูบในทางตรงกันข้ามท่อทางเข้าแบบกั้นหอยจะทำให้เกิดการ Swirl ที่ท่อทางเข้าของวาล์วและความเร็วจะประกอบด้วย v_r และ v_z ที่จะไหลผ่านวาล์วเข้าไปในขณะที่วาล์วกำลังเปิด ส่วน v_{θ} ซึ่งจะสัมพันธ์กับแกนวาล์วจะประมาณว่าเป็นความเร็วรวมรอบ ๆ วาล์วที่กำลังเปิด

รูปที่ 14 จะแสดงความเร็วต่าง ๆ ที่วัดในระนาบที่วาล์วเปิดและเป็นการไหลแบบคงที่ (Steady flow) โดยการทดลองใช้ท่อทางเข้าทั้งสองแบบ ซึ่งตำแหน่งวาล์ว และผนังของกระบอกสูบ แสดงไว้ในรูปที่ 14-a รูปที่ 14-b แสดงท่อทางเข้าแบบกั้นหอย โดยที่อากาศที่ไหลเข้าสู่กระบอกสูบโดยรอบของวาล์วที่กำลังเปิด ความเร็วตามแนวรัศมี และความเร็วตามแนวแกนรอบ ๆ วาล์ว จะเป็นรูปแบบที่มีความสำคัญ โดยที่ความเร็วของการ Swirl ที่แกนของวาล์วสำหรับการใช้ท่อทางเข้าแบบกั้นหอย จะถือได้ว่าประมาณเท่ากับค่าครึ่งหนึ่งของความเร็วตามแนวรัศมีและความเร็วตามแนวแกน

การไหลของอากาศแบบ Swirl ภายในกระบอกสูบโดยการใช้งานของเครื่องยนต์ จะมีลักษณะไม่เป็นรูปแบบ ความเร็วที่ออกจากวาล์วในแต่ละจุดในขั้นตอนการดูด จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่วาล์วนั้นเปิด และความเร็วของกระบอกสูบ ซึ่งความเร็วจะมีค่าสูงที่สุดในจังหวะแรกของการดูด ดังนั้นความเร็วของการ Swirl ที่ออกจากช่วงจังหวะดูด จะมีค่าสูงกว่าความเร็ว Swirl ที่อยู่ในช่วงก่อนจะหมดจังหวะดูด คือความเร็วของการ Swirl จะมีการแบ่งเป็นชั้น ๆ

นอกจากนี้รูปแบบของการไหลในกระบอกสูบในระหว่างการดูด ที่เป็นแบบ turbulent จะถือว่าเป็นแบบการไหลในกระบอกสูบมีลักษณะใกล้เคียงกับการหมุนของ Solid body ในการเพิ่มรัศมีซึ่งเป็นการเพิ่มการไหลโดยตรง จะทำให้ความเร็วของการ swirl สูงขึ้น ขณะที่ความเร็วของลูกสูบลดลงในระหว่างจังหวะดูด รูปแบบของการ Swirl จะมีการกระจายอีกครั้งหนึ่งด้วยค่าความเร็วของ Swirl ที่

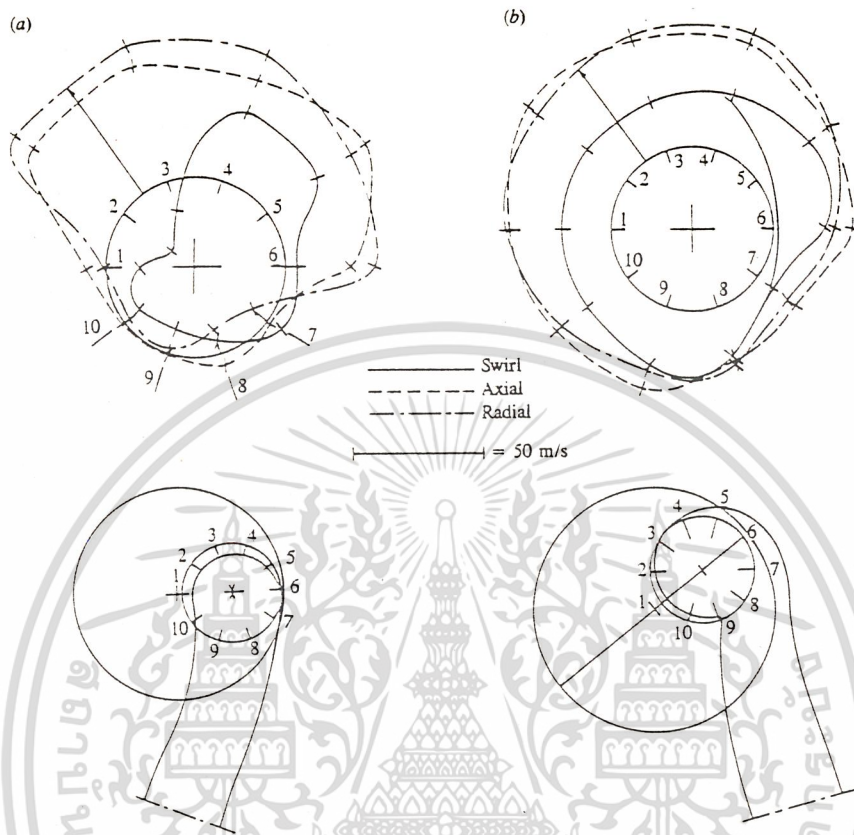


FIGURE 14 Swirl, axial, and radial velocities measured 2 mm from cylinder head around the valve circumference for (a) tangential deflector-wall port and (b) helical port; magnitude of velocity is given by the distance along a radial line (from valve axis), from valve outline to the respective curve scaled by the reference length (examples of radial velocity indicated by two arrows); valve lift = 12.8 mm. ^{26, 27}

การเปลี่ยนแปลง SWIRL ภายในกระบอกสูบ

โมเมนตัมเชิงมุมของอากาศที่เข้าสู่กระบอกสูบที่มุมของข้อเหวี่ยงแต่ละค่าระหว่างการดูด จะมีค่าลดลงเมื่อผ่านกระบวนการดูด และที่เหลือจะผ่านไปยังกระบวนการอัด ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผนังและการกระจายของ Turbulent ของของไหล โดยที่ Momentum ภายในกระบอกสูบจะมีการสูญเสียที่ช่วงปลายของขั้นตอนการอัด อย่างไรก็ตาม ความเร็วของการ Swirl ในการอัดก็สามารถเพิ่มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าขึ้นได้โดยการออกแบบห้องเผาไหม้ที่มีความเหมาะสม ในการออกแบบเครื่องยนต์แบบ Direct-ไม่วากรัมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเผยแพร่

injection จะมีการใช้การ Swirl ของอากาศได้ดีกว่าการผสมกันระหว่างสารเชื้อเพลิงและอากาศ
 ในกระบอกสูบ ความเร็ว Swirl ของอากาศที่ไหลทะลุเข้ามาในกระบอกสูบในระหว่างขั้นตอนการดูด
 จะถูกทำให้เพิ่มขึ้นได้โดยการช่วยอัดอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้ โดยปกติจะถือว่าแกนของกระบอกสูบ
 เป็นจุดเดียวกับจุดศูนย์กลางกระบอกสูบ

เมื่อพิจารณาโดยการตัดผลของแรงเสียดทานทั้ง ส่วนค่าโมเมนตัมเชิงมุมยังคงคิดอยู่ จะได้ว่า
 Momentum of inertia ของอากาศจะลดลงเมื่อความเร็วเชิงมุมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม โมเมนตัม
 เชิงมุมสุทธิที่เกิดขึ้นภายในกระบอกสูบจะลดลงเนื่องจากแรงเสียดทานที่ผนังกระบอกสูบ

โมเมนตัมเชิงมุมภายในกระบอกสูบเมื่อคิดตามเวลา และการอนุรักษ์โมเมนตัม จะได้ว่า

$$\frac{dI}{dt} = J_i - T_f \tag{20}$$

J_i คือความหนาแน่นโมเมนตัมเชิงมุมภายในกระบอกสูบ

T_f คือ torque ที่เกิดจากแรงเสียดทานที่ผนัง

ซึ่งในแต่ละจุดในขั้นตอนการดูด จะหา J_i ได้จาก

$$J_i = \int_{A_v} \rho r v_0 \cdot dA_v \tag{21}$$

dA_v คือ element ของพื้นที่ที่วาล์วเปิด ซึ่งจะหาจากรูปที่ 15 โดยขณะที่โมเมนตัมเชิงมุม
 กำลังเข้าสู่กระบอกสูบในขั้นตอนการดูดคือ

$$\Gamma_{c,i} = \int_{t_{i_0}}^{t_{i_e}} \int_{A_v} r v_0 \cdot dA_v dt \tag{22}$$

ซึ่งโมเมนตัมเชิงมุมที่เกิดขึ้นจริงภายในกระบอกสูบที่จุดสุดท้ายของขั้นตอนการดูดจะมีค่าน้อยกว่านี้ เนื่องจาก
 จากแรงเสียดทานที่ผนังที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการดูด แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดต่อเนื่องกันไปจน
 ถึงขั้นตอนการอัด ดังนั้นโมเมนตัมเชิงมุมรวมที่จุดสุดท้ายของขั้นตอนการอัดมีค่าลดลง

ในการหาแรงเสียดทานที่ผนังส่วนบนของกระบอกสูบและส่วนบนของลูกสูบซึ่งจะประมาณได้จากสูตร
 ที่ใช้ในการหาแรงเสียดทาน ที่พัฒนามาจากการไหลผ่านระนาบแบนด้วยลักษณะคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เหมาะสม
 แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผนังกระบอกสูบสามารถประมาณได้จาก ความเค้นเฉือนที่ผนัง

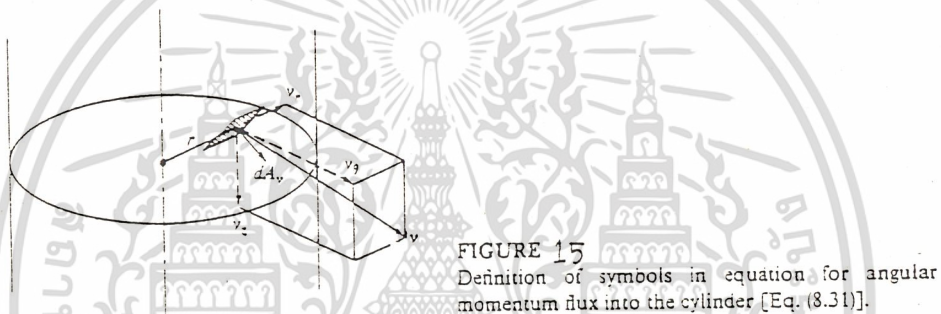
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแต่งสำเนา หรือส่งต่อข้อมูลไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ $\tau = 1/2 \rho \left(\frac{w_s B}{2}\right)^2 C_f$ (23)

โดยให้ w_s = ค่า Solid-body Swirl
และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน C_F หาได้จาก

$$C_F = 0.037 \lambda (ReB)^{-0.2} \tag{24}$$

$\lambda = (1.5)^{28}$ คือค่าคงที่ที่ยกมาให้ได้สำหรับความแตกต่างระหว่างระนาบแบนกับผนังของกระบอกสูบ

$$ReB = \rho (BW_s/2) (\eta B/\mu) \tag{25}$$



ส่วนแรงเสียดทานที่เกิดกับลูกสูบก็สามารถหาได้เช่นกัน โดยการเปลี่ยนความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางของกระบอกสูบเป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกสูบ (D_B) แทน แรงเสียดทานที่เกิดที่ส่วนบนของกระบอกสูบและส่วนบนของลูกสูบสามารถหาได้จากการประมาณจากสมการ (23) และสมการ (24) อย่างไรก็ตามเมื่อมีความเร็ว v_{θ} ที่ผนัง ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามรัศมี ความเค้นเฉือนสามารถหาได้โดย

$$\tau(r) = C_1 1/2 \rho [v_{\theta}(r)]^2 Re^{-0.2} \tag{26}$$

$$Re = \frac{\rho v_{\theta}(r) r}{\mu} \tag{27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งให้ $C_1 = 0.055$ เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปจะพิจารณาผลของการ Swirl เนื่องจากการแทนที่ของอากาศภายในกระบวนการอัด ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจน คือ ปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่ปรากฏในสภาวะการไหลแบบ bowl-in-piston ห้องเผาไหม้จะถูกออกแบบให้เป็นแบบ direct-injection ด้วยความเร็วระดับปานกลางถึงสูง อย่างไรก็ตาม เครื่องยนต์แบบ Spark-ignition ที่มีการใช้การ Swirl เพื่อเพิ่มอัตราการเผาไหม้ รูปร่างของห้องเผาไหม้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับแบบ Top-center ซึ่งจะมีการอัดเพื่อเพิ่มการเคลื่อนที่ของสารเชื้อเพลิง

สำหรับค่าของการ Swirl ที่ไหลภายในกระบอกสูบในสภาวะสิ้นสุดของจังหวะดูดและไม่คิดค่าของแรงเสียดทานจะพบว่าค่า moment of inertia ของอากาศภายในแกนของกระบอกสูบมีค่าลดลง ค่าความเร็วเชิงมุมของอากาศจะเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม ตัวอย่างเช่น การไหลของ solid-body ในกระบอกสูบค่ามวลของอากาศ (m_c) ค่า initial angular momentum ($\Gamma_{c,i}$) และ solid body ($w_{s,i}$) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_c w_{s,i} = \Gamma_{c,i} \quad (28)$$

I_c : moment of inertia = $m_c B^2 / 8$ จะได้ว่า

$$I_c = \frac{m_c B^2 [(z/h_B) + (D_B/B) + 1]}{8 [(z/h_B)/(D_B/B)^2]} \quad (29)$$

D_B และ h_B เส้นผ่าศูนย์กลางและส่วนสูง

z คือ ระยะทางจากส่วนบนสุดของลูกสูบไปยังกระบอกสูบ

ที่ตำแหน่ง TC (Top-dead-center) จะได้ $z = 0$ ดังนั้นในการคิด w_s จะเพิ่มขึ้นจาก $(B/D_B)^2$

ในเครื่องยนต์ที่มีการออกแบบห้องเผาไหม้แบบ bowl-in-piston ค่า Swirl จะมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยจะมีค่าประมาณ 2 หรือ 3 ซึ่งเนื่องมาจากค่าแรงเสียดทาน, การกระจายของของไหลแบบ turbulent และค่า velocity gradient และของไหลบางส่วนยังคงอยู่ในระหว่างช่องด้านบนสุดของลูกสูบ การสูญเสียของค่าโมเมนตัมเชิงมุมจะมีผลมาจากรายละเอียดในส่วนต่างๆ ของรูปแบบของการ Swirl และความเร็วของเครื่องยนต์ การกระจายความเร็วของการ Swirl ภายในกระบอกสูบที่สภาวะสุดท้ายของการดูด จะแสดงให้เห็นว่า ความเร็วในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากกรณี ยกเว้นเมื่อเข้าใกล้ผนังของกระบอกสูบ ค่าแรงเสียดทานจะทำให้ความเร็วลดลง การกระจายความเร็วไม่ได้เป็นการหมุนของ solid-body ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการออกแบบที่ช่องทางเข้าและ

เงื่อนไขต่าง ๆ ในการปฏิบัติ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีค่าใกล้เคียงกับการหมุนของ solid-body การกระจายความเร็วของ solid-body จะมีค่าสูงเมื่ออยู่ในเครื่องยนต์ที่มีความเร็วสูง ๆ

ในการไหลแทนที่ของอากาศในสภาวะการอัด รูปแบบของการไหลแบบต่าง ๆ ยังคงต่อเนื่อง โดยการกระจายภายในจังหวะอัด โดยมีค่า swirl ratio ประมาณ 3 ถึง 5 ที่จุด Top-center ในห้องเผาไหม้ที่เส้นรัศมีของห้องเผาไหม้น้อยกว่ารูปของกระบอกสูบเช่น แบบ bowl-in-piston การกระจายความเร็วที่ท่ามุมต่าง ๆ จะเปลี่ยนแปลงในระหว่างสภาวะการอัด เมื่อสังเกตด้านข้างจะพบว่าของที่มีการไหลภายในกระบอกสูบจะเกิดการหักเห เมื่อไม่คิดผลของแรงเสียดทานจะพบว่า โมเมนตัมเชิงมุมของการไหลในแต่ละ element จะยังคงที่ เช่น เมื่อเพิ่มความเร็วที่ท่ามุมของของไหลจะพบว่าจะเป็นส่วนกลับกับรัศมี ในการวัดค่าการกระจายความเร็วของการ swirl ภายในกระบอกสูบ bowl-in-piston จะวัดได้ดังนี้คือ

ให้ V_B : bowl volume

V : Cylinder volume

S_p : piston speed

จะได้ว่า

$$\frac{dm_B}{dt} = \frac{\rho_c (V_B/V) (V_d/V) S_p}{L} \quad (30)$$

ความเร็วของก๊าซภายในกระบอกสูบจะมีค่าสูงขึ้นจนถึงจุดสิ้นสุดของจังหวะอัด และจะมีค่าสูงที่สุดที่จุด TC ความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะให้ เป็น v_{θ} ซึ่งจะใกล้เคียงกับมุมของข้อเหวี่ยงที่อยู่ใกล้ ๆ กับ TC ในการวัดความเร็วที่กระจายตามแนวรัศมีของความเร็วที่ท่ามุมต่าง ๆ แสดงได้ดังภาพ (16) โดยการวัดจะใช้การวิเคราะห์การเผาไหม้ของคาร์บอนในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซล

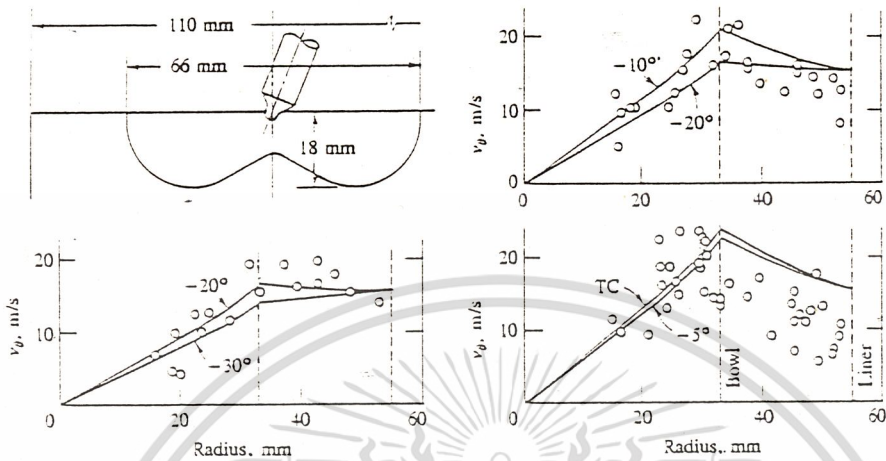


FIGURE 16 Velocity measurements as a function of radius across the combustion chamber of a firing, bowl-in-piston, direct-injection diesel engine. Schematic shows the chamber geometry. Solid lines are calculations based on the assumption of constant angular momentum for fluid elements as they move radially inward.³¹

SQUISH (TUMBLE)

squish เป็นการเคลื่อนที่ของก๊าซ ที่มีลักษณะเป็นการหมุนแนวรัศมี หรือหมุนรอบแนวของรัศมี ซึ่งจะเกิดขึ้นจนถึงจังหวะสุดท้ายของการอัด เมื่อผิวส่วนหน้าของลูกสูบเคลื่อนที่เข้าใกล้ เกือบจะถึงผิวส่วนบนของกระบอกสูบบนรูปที่(17) จะแสดงให้เห็นลักษณะการเคลื่อนที่ของก๊าซเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งรูป(17-a) จะแสดงลักษณะของห้องเผาไหม้แบบ Wedge-shape ของเครื่องยนต์แบบ SI และรูป (17-b)จะแสดงของห้องเผาไหม้แบบ bowl-in-piston ของเครื่องยนต์ดีเซลแบบ direct-injection

จำนวนของ squish จะหาได้โดยใช้ percentage-squish-area เช่น percentageของพื้นที่ ลูกสูบจะมีค่า $\pi B^2/4$ ซึ่งจะประมาณให้ใกล้เคียงกับค่าของcylinder headซึ่งจะแสดงตั้งพื้นที่ที่เรเงา ในรูปที่(17)

squish ที่เกิดขึ้น จะมีผลมาจากลักษณะรูปร่างของห้องเผาไหม้ ความเร็วของ squish ในทาง ทฤษฎีสามารถคำนวณได้จากระยะทางของก๊าซที่เคลื่อนที่ผ่านขอบเขตของsquishดังแสดงในพื้นที่ที่เรเงา ในรูปที่ (18-a) และจากการใช้การอนุรักษ์เชิงมวลโดยตัดผลกระทบของความดัน, ความเสียดทาน, การสูญเสียที่แหวนของลูกสูบ และการถ่ายเทความร้อน จะสามารถหาความเร็วของ squish ได้ดังนี้ใช้

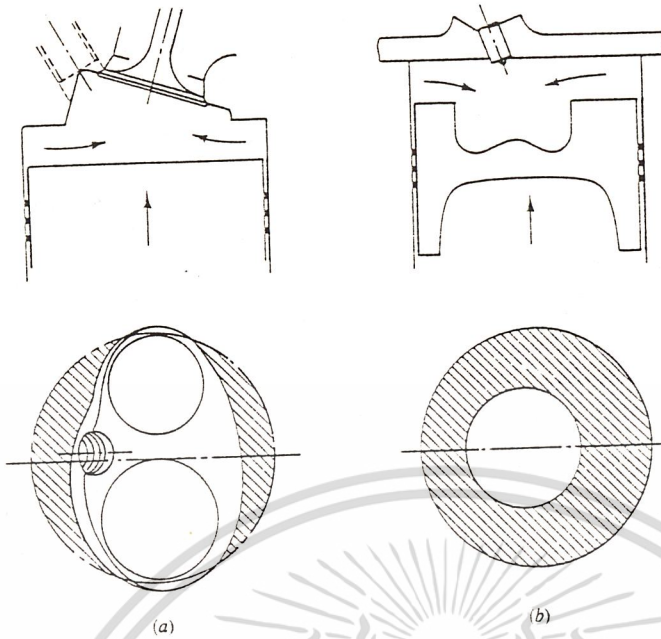


FIGURE 17
Schematics of how piston motion generates squish: (a) wedge-shaped SI engine combustion chamber; (b) bowl-in-piston direct-injection diesel combustion chamber.

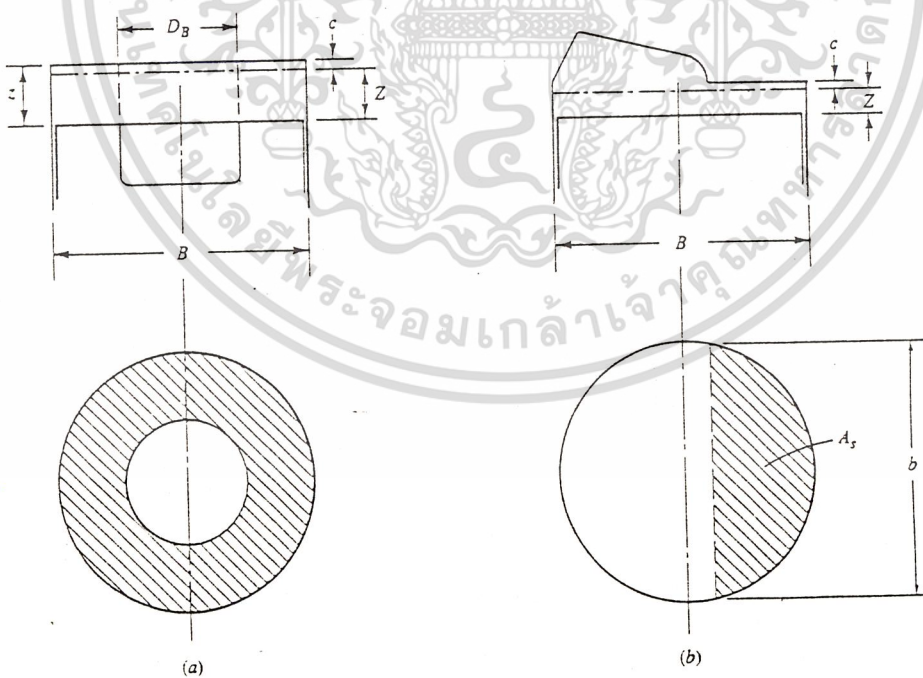


FIGURE 18
(a) Schematic of axisymmetric bowl-in-piston chamber for Eq. (8.36). (b) Schematic of wedge chamber with transverse squish for Eq. (8.37).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Bowl-in-piston (รูปที่ 18-a)

$$\frac{V_{sq}}{S_p} = \frac{D_B[(B/D_B)^2 - 1]}{4z} \frac{V_B}{A_c z + V_B} \quad (31)$$

V_{sq} คือความเร็วของ squish

V_B คือปริมาตรของ piston bowl

A_c คือพื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบ ($\pi B^2/4$)

S_p คือความเร็วของลูกสูบขณะใดขณะหนึ่ง

z คือระยะทางระหว่างหัวของลูกสูบกับ cylinder head

($z=c+Z$ เมื่อ $Z=l+a-s$)

2. Simple wedge chamber

$$\frac{V_{sq}}{S_p} = \frac{A_s[1-(Z+c)/(C+Z)]}{b(Z+c)} \quad (32)$$

A_s คือพื้นที่ของ squish

b คือความกว้างของ squish

$C=Z/(r_c-1)$ ที่จุดสิ้นสุดของขั้นตอนการดูด

รูปที่ (19) จะแสดงถึงความเร็วของ squish ในทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับกับค่า mean-piston-speed ที่ค่า different ratio (D_B/B) และค่า clearance (c) ต่างๆ

ความเร็วของ squish จะมีค่าสูงที่สุดที่ 10 องศา ก่อนศูนย์ตายบน และเมื่อผ่าน TC ไปแล้ว ค่าความเร็วของ squish จะมีค่าเป็นลบและจะเกิดการไหลวนกลับภายในขอบเขตของ clearance ซึ่งจะมีค่าเท่ากับการไหลในช่วงแรกก่อนถึงศูนย์ตายบน ภายใต้งานของเครื่องยนต์ ซึ่งในแบบจำลองต่างๆ เหล่านี้จะไม่คิดค่าของ gas inertia, ค่าความเสียดทาน, ค่าการรั่วไหลของก๊าซที่แหวนลูกสูบและการถ่ายเทความร้อน โดยผลกระทบจาก gas inertia และความเสียดทานจะมีค่าน้อยมาก ในขณะที่ตัวกันผลกระทบของการรั่วไหลของก๊าซที่แหวนลูกสูบและผลจากการถ่ายเทความร้อนจะมีความสำคัญมากกว่า ค่าการสูญเสียความเร็วของ squish เนื่องจากการรั่วไหลจะมีความสัมพันธ์กับค่า mean piston speed เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาติเห็นไปไซเบอร์ชอนตานการค่า speed ค่าการรั่วไหลจะหาได้จาก ไม่วากรณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_L = \frac{A_{E,L} \sqrt{V_{RT}^{IVC}}}{N V d} \tag{33}$$

$A_{E,L}$ คือ effective leakage area

T_{IVC} คือ อุณหภูมิของก๊าซในกระบอกสูบในขณะที่วาล์วปิด

การรั่วไหลได้ถูกจำลองให้เป็นการไหลผ่าน effective area โดยที่ค่า $\Delta V / V_{sq}$ จะแสดงในรูปที่ (20) ในการรั่วโดยปกติจะมีผลต่อค่า V_{sq} น้อยมาก การลดลงของความเร็วของ squish เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนก็จะให้ผลน้อย เช่นเดียวกันเมื่อเป็นเครื่องยนต์แบบมาตรฐาน

ค่า $\Delta V / V_{sq}$ จะแสดงในรูปที่ (20) ด้วย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่าความเร็ว squish น้อยเช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่าค่าต่างๆ เหล่านี้จะมีความสำคัญในการทำให้ค่าความเร็ว squish ลดลงจากค่าสูงสุด เมื่อลูกสูบเข้าใกล้ TC การวัดความเร็วในเครื่องยนต์จะเป็นการสนับสนุนทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้ว ซึ่งจะใช้ความเร็วของเครื่องยนต์ในการทำนายค่าต่างๆ ในผลกระทบจากการรั่วและการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม ทฤษฎีเหล่านี้จะสามารถนำมาใช้หาค่า bowl diameter/bore ratio, ค่า clearance height ที่มีผลต่อค่าความเร็ว squish ได้

ในการเปลี่ยนทิศทางของการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีในขณะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ผ่าน TC สามารถอธิบายได้ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ของเครื่องยนต์ และในสภาพที่มีการเผาไหม้จะมีการขยายตัวของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่ย้อนกลับมีค่าสูงขึ้น

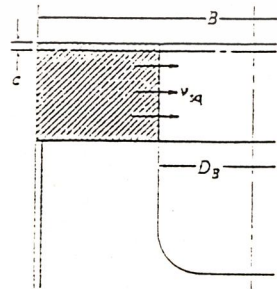
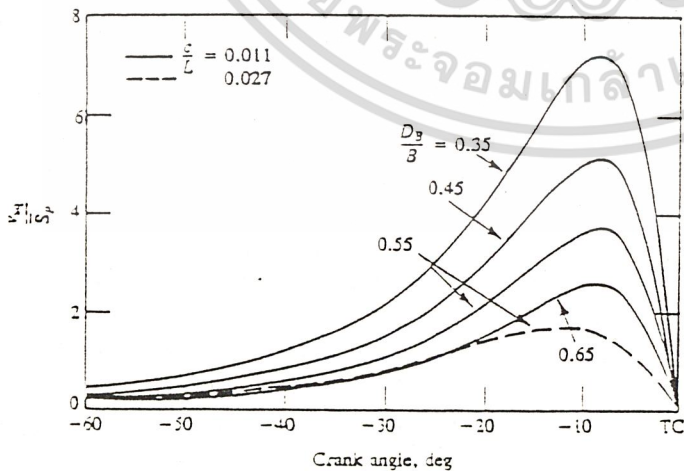


FIGURE 14
Theoretical squish velocity divided by mean piston speed for bowl-in-piston chambers, for different D_3/B and c/L (clearance height/stroke). $B/L = 0.914$, $V_3/V_1 = 0.056$, connecting rod length/crank radius = 3.76.¹³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

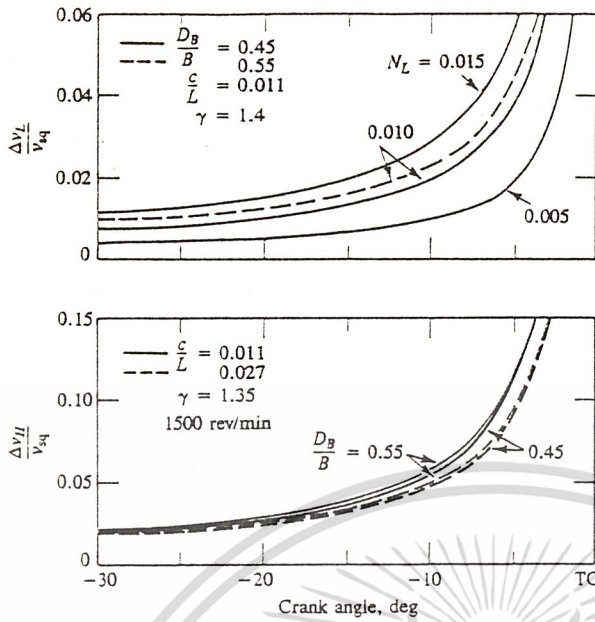


FIGURE 20 Values of squish velocity decrement due to leakage Δv_L and heat transfer Δv_H , normalized by the ideal squish velocity, as a function of crank angle.³⁵

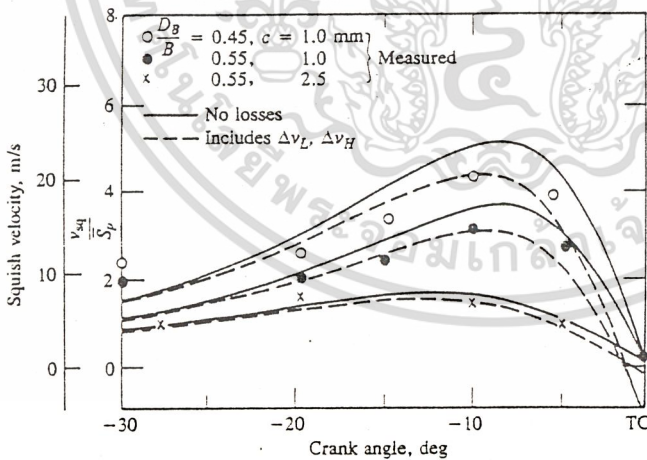


FIGURE 21 Comparison of measured squish velocities in bowl-in-piston combustion chambers, with different bowl diameter/bore ratios and clearance heights, to calculated ideal squish velocity (solid lines) and calculations corrected for leakage and heat transfer (dashed lines). Bore = 85 mm, stroke = 93 mm, 1500 rev/min.³⁵

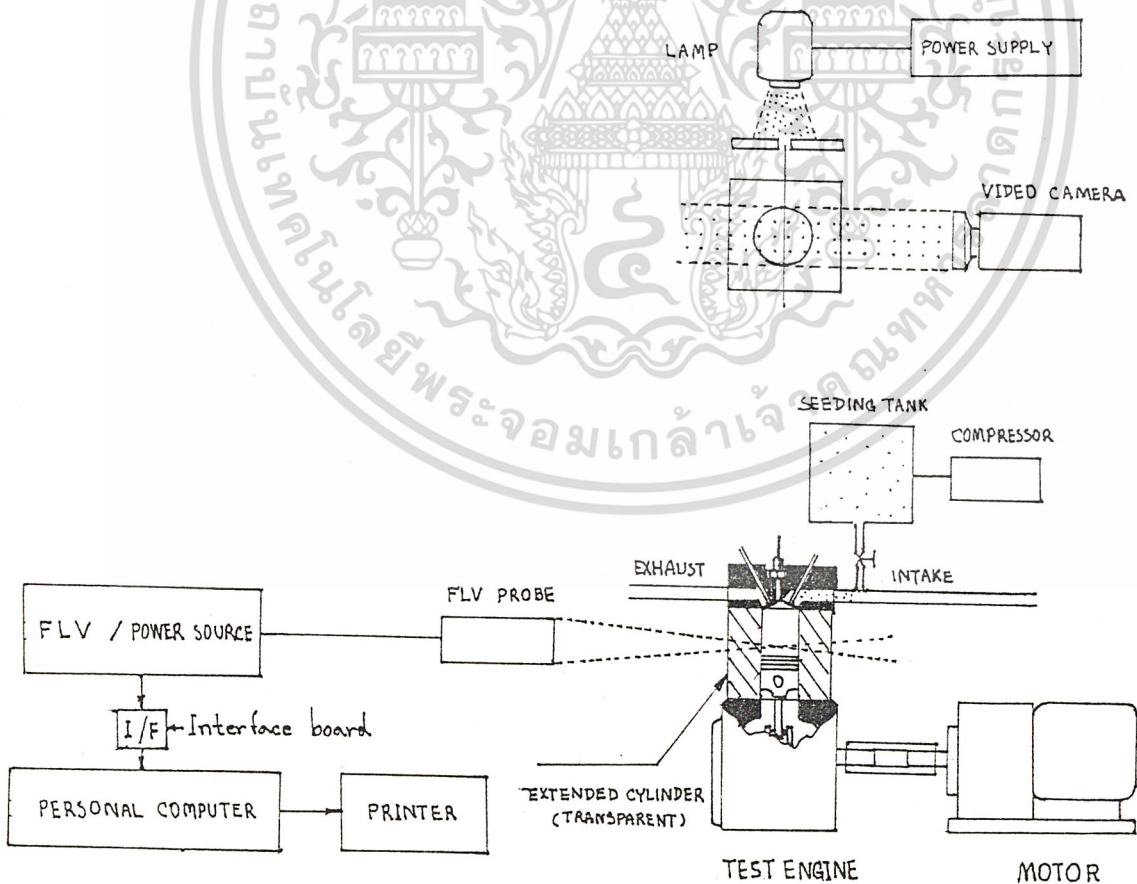
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองเพื่อการศึกษาการไหลในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ

ในการศึกษาการไหลในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ จะศึกษาโดยการวัดความเร็วและถ่ายภาพจากด้านข้างของการไหลของอนุภาค เพื่อสามารถมองเห็นลักษณะการไหลในแนวรัศมีได้

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ประกอบการทดลอง

การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับชุดการทดลองเพื่อสังเกตการไหลในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ แสดงดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ เป็นเครื่องยนต์สูบเดี่ยว 4 จังหวะ แบบ
- 2 วาล์ว (วาล์วไอดี 1 วาล์ว, วาล์วไอเสีย 1 วาล์ว) ฝาสูบเป็นแบบ Overhead cam สเปคของเครื่องยนต์แสดงดังตารางที่ 1

| HONDA ENGINE 110 CC | |
|---------------------|---------------|
| STROKE | 4 STROKE |
| COOLING | AIR |
| COMBUSTION CHAMBER | PENTROOF |
| NUMBER OF CYLINDER | 1 |
| BORE * STROKE | 52 mm * 52 mm |
| DISPLACEMENT VOLUME | 108.67 ml |
| COMPRESSION RATIO | 6.1 |

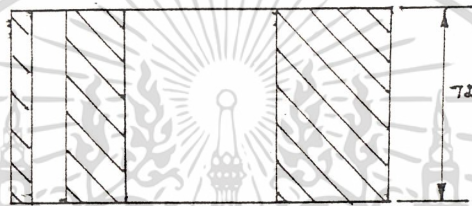
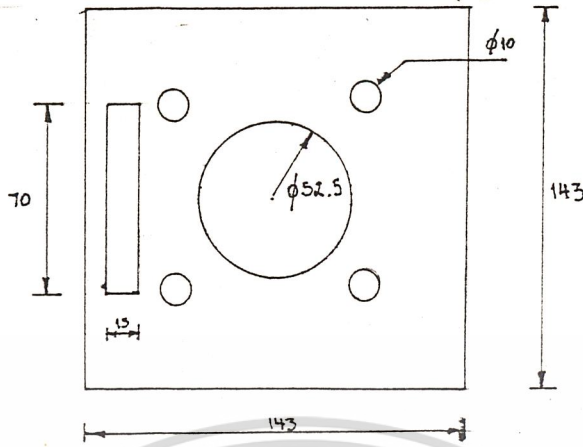
ตารางที่ 1 เครื่องยนต์ทดสอบ

2. กระจกอบสี ทำด้วยเรซินหล่อใส ในอัตราส่วนผสมน้ำยาหล่อแข็ง 1 % ซึ่งจะหล่อเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม แล้วนำไปขึ้นรูป (โดยการกลึง, เจาะ, ขัด) ให้มีลักษณะดังรูปที่ 2 เมื่อขึ้นรูปเสร็จได้ขนาดตามต้องการแล้ว จึงนำมาขัดให้เป็นมัน โดยใช้กระดาษทรายละเอียดขัด แล้วใช้ผงขัดขนาด 1 ไมคอน ขัดจนเป็นมัน

เนื่องจากเรซินที่ใช้หล่อ มีความแข็งน้อย ฉะนั้นวัสดุที่ใช้ทำแหวนลูกสูบจึงควรเป็นวัสดุที่ไม่แข็งซึ่งในการทดลองนี้ใช้เทฟลอน

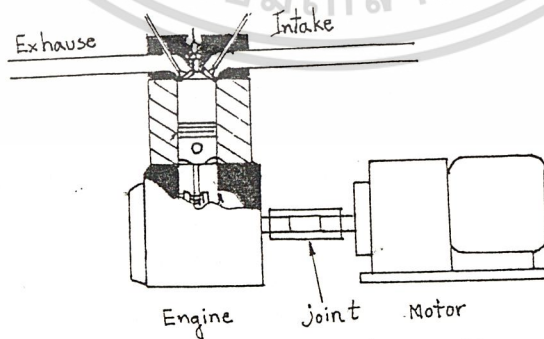
เมื่อทำการทดลองในขณะที่เครื่องยนต์หมุน แหวนของลูกสูบจะไปขีดกับผนังของกระจกอบซึ่งเป็นเรซิน เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งกระจกอบจะหมอง ไม่สามารถถ่ายภาพการไหลได้ ดังนั้นจึงต้องทำการขัดใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของกระบอกสูบโลหะที่ทำจากเรซิน

3. มอเตอร์ขับ ใช้สำหรับขับเครื่องยนต์ เนื่องจากการทดสอบจะไม่มี
 การจุดระเบิด ฉะนั้นเครื่องยนต์จึงไม่สามารถหมุนเองได้ จึงต้องใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขับ
 เครื่องยนต์ มอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์ 3 phase ชนิด V.S. Motor มีแรงควบคุม
 สำหรับปรับความเร็วของมอเตอร์
 ลักษณะการต่อมอเตอร์เข้ากับเครื่องยนต์จะต่อผ่านเพลลาโดยตรงดังรูป



รูปที่ 3 การส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังเครื่องยนต์

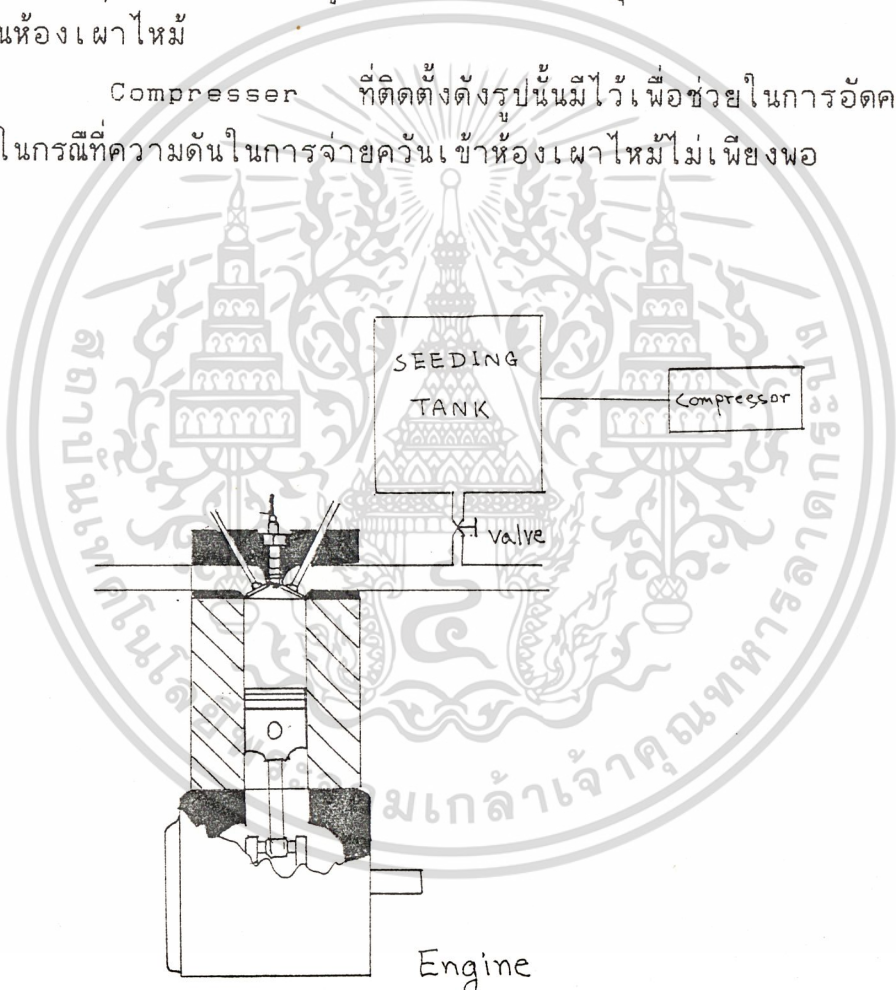
ระหว่างเพลลาของมอเตอร์กับเพลลาเครื่องยนต์จะมี joint เป็นตัวเชื่อม ซึ่งทำ
 ด้วยวัสดุที่มีความยืดหยุ่นดี เพื่อป้องกันการลั่นในกรณีที่เพลลาไม่ได้ศูนย์กัน
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เครื่องมือวัดความเร็วรอบเครื่องยนต์ ใช้ Photo sensor ซึ่งจะวัดที่แกนเพลลาของข้อเหวี่ยง

5. ระบบการป้อนอนุภาค (Seeding system)

ระบบการป้อนอนุภาคแสดงในรูปที่ 4 คิวซึ่งเป็นอนุภาคเล็กๆ ถูกเตรียมไว้ในถัง (Seeding tank) การควบคุมการป้อนอนุภาคทำโดยวาล์วกล เมื่อไม่มีการป้อนอนุภาค วาล์วก็จะถูกปิด อนุภาคของคิวจะไม่สามารถไหลออกมาได้ ในกรณีที่ต้องการป้อนอนุภาค วาล์วจะถูกเปิด เป็นผลให้อนุภาคหรือคิวไหลออกมาผ่านลิ้นไอดีเข้าไปในห้องเผาไหม้

Compressor ที่ติดตั้งดังรูปนั้นมีไว้เพื่อช่วยในการอัดคิวเข้าไปในห้องเผาไหม้ในกรณีที่ความดันในการจ่ายคิวเข้าห้องเผาไหม้ไม่เพียงพอ



รูปที่ 4 ระบบการป้อนอนุภาค

6. ระบบการสังเกตการไหล (Flow visualization) ใช้วิธีตามรอย การเคลื่อนที่ของอนุภาค (PTV, Particle Tracking Velocity) ชุดทดลองแสดงใน รูปที่ 1 กล้องวิดีโอถ่ายภาพถูกใช้ในการจับภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาค เครื่องยนต์ แสงจากดวงไฟความเข้มสูงถูกฉายผ่านช่องแคบขนาดประมาณ 1mm เพื่อถ่ายภาพ หน้าตัดที่ต้องการ และวิเคราะห์ภาพได้จากกล้องวิดีโอ และ FLV ซึ่งควบคุมโดย คอมพิวเตอร์

วิธีทดลอง

ในการทดสอบการไหลของอากาศในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ เริ่ม จากการ start มอเตอร์ และปรับความเร็วมอเตอร์ให้ได้ความเร็วรอบที่จะทดสอบ ทำ ห้องทดลองให้มืดเพื่อเน้นในส่วนที่ถ่ายภาพ เปิดไฟผ่าน slit ไปยังกระบอกสูบ เปิด วาล์วป้อนอนุภาคให้อนุภาคไหลเข้ากระบอกสูบพร้อมกับเริ่มบันทึกภาพ หลังจากนั้นปิดวาล์ว และหยุดการบันทึกภาพ ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนการบันทึกจากหน้าตัดต่างๆ, เปลี่ยน ความเร็วรอบเครื่องยนต์

อนึ่ง เนื่องจากการมองผ่านกระบอกสูบใสที่ผิวโค้งจึงทำให้เกิดการเบี่ยงเบน ของแสง ดังนั้นก่อนเริ่มการบันทึกภาพจึงทำการถ่ายภาพลักษณะการเบี่ยงเบนของแสง เพื่อนำไปคำนวณแก้ค่าความเร็วของอนุภาคภายหลัง

ผลการทดลองสำหรับ flow visualization

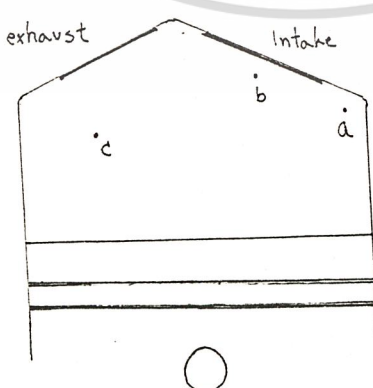
การทดลองสำหรับการสังเกตการณ์ไหลในเครื่องยนต์ 4 จังหวะ แบ่งเป็นสองส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ ส่วนการบันทึกภาพการไหลของอนุภาคในกระบอกสูบ และส่วนการวัดความเร็วอนุภาคในห้องเผาไหม้

1. ผลการบันทึกภาพการไหลในห้องเผาไหม้

การบันทึกภาพจากการทดสอบซึ่งใช้ควันเป็นอนุภาค โดยวัดที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ผลการที่ได้ถูกบันทึกไว้ในวีดีโอเทป จากการบันทึกภาพที่ความเร็วต่ำมาก (น้อยกว่า 100 rev/min) สามารถมองเห็นการไหลของอนุภาคในกระบอกสูบได้ แต่สำหรับการบันทึกภาพที่ความเร็วสูงขึ้น (มากกว่า 400 rev/min) ภาพที่ได้ค่อนข้างมัวซึ่งไม่สามารถมองเห็นการไหลได้

2. ผลการวัดความเร็วของอนุภาค

การวัดความเร็วอนุภาคในกระบอกสูบโดยใช้ FLV เป็นเครื่องมือในการวัดความเร็ว โดยวัดที่จุดต่าง ๆ ในกระบอกสูบ ผลที่ได้แสดงดังกราฟ



รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ที่ทำการวัด

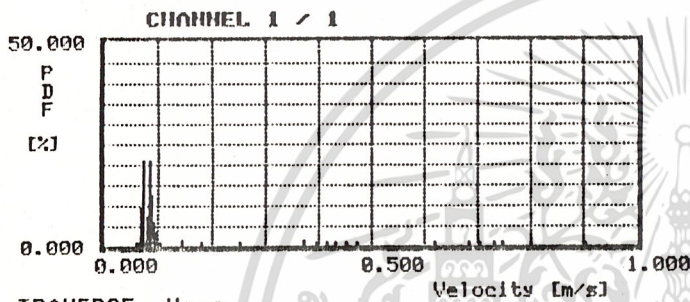
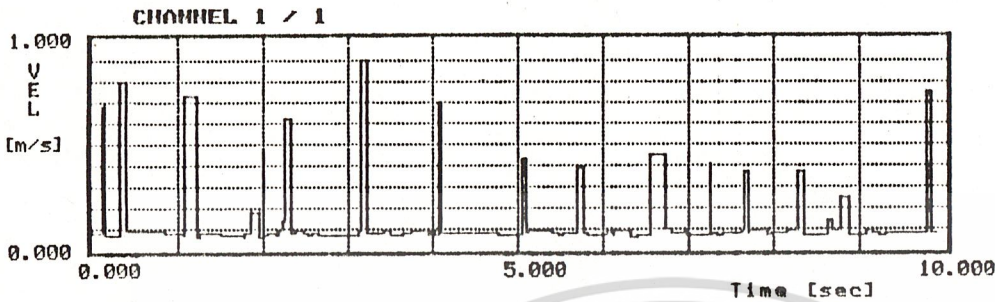
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KANOMAX

<ReDisplay>

File TEST1.129 Position [mm] X:0.0 Y:0.0 Z:0.0
 Date 03/17/94 Comment powder

Acq. Mode BURST Vel. Bias OFF n Sigma [n = 3.00] OFF



N. D. D. x 118/1024
 Average Vel. x 0.1447 [m/s]
 Standard Dev. x 0.1723 [m/s]
 Turbulence Int. x 119.0925 [%]
 Skewness Factor x 1.4270
 Flatness Factor x 10.2109
 Max. Vel. x 0.9000 [m/s]
 Min. Vel. x 0.0632 [m/s]

TRAVERSE None

<F>COMMAND <Q>QUIT

Data Not Saved

รูปที่ 2 แสดงความเร็วของอนุภาคที่วัด ณ จุด a ตามรูปที่ 1

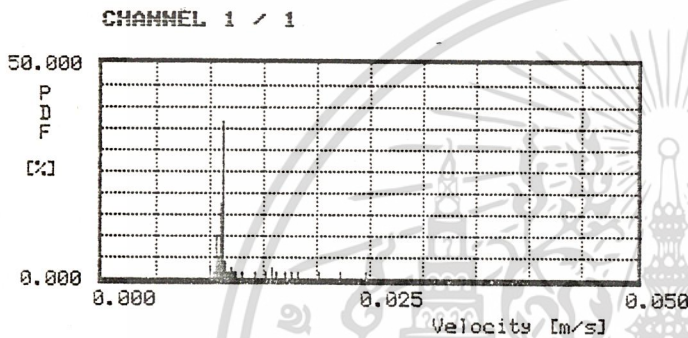
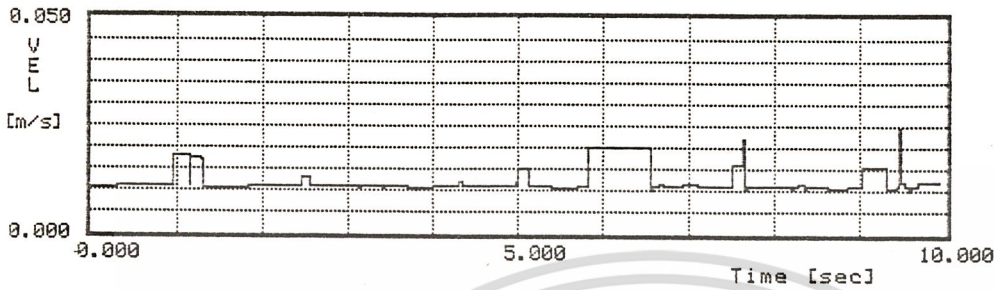
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KANOMAX

<ReDisplay>

File TEST1.130 Position [mm] X:0.0 Y:0.0 Z:0.0
 Date 03/17/94 Comment powder

CHANNEL 1 / 1 Acq. Mode BURST Vel. Bias OFF n Sigma (n = 3.00) OFF



N. D. D. : 79/1024
 Average Vel. : 0.0122 [m/s]
 Standard Dev. : 0.0027 [m/s]
 Turbulence Int. : 21.8519 [%]
 Skewness Factor : 1.4343
 Flatness Factor : 11.2548
 Max. Vel. : 0.0248 [m/s]
 Min. Vel. : 0.0100 [m/s]

<F1>COMMAND <Q>QUIT

รูปที่ 3 แสดงความเร็วของอนุภาคที่วัด ณ จุด b ตามรูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

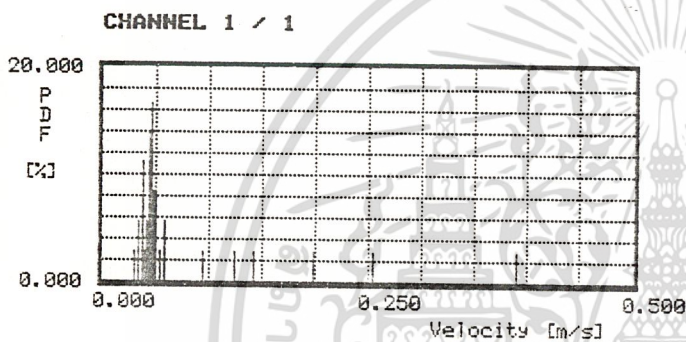
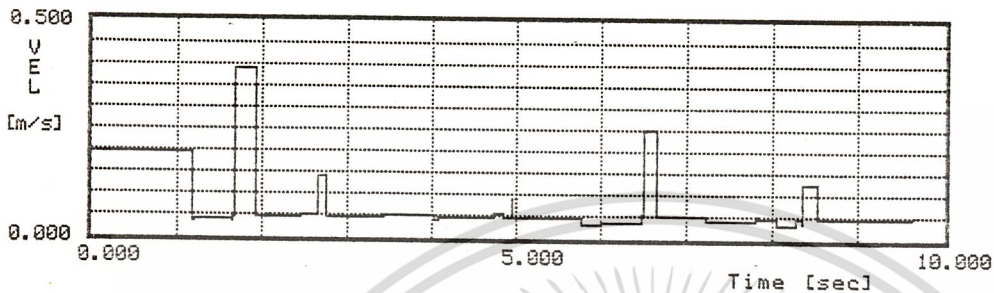
KANOMAX

<ReDisplay>

File TEST1.128
Date 03/17/94

Position [mm] X:0.0 Y:0.0 Z:0.0
Comment powder

CHANNEL 1 / 1 Acq. Mode BURST Vel. Bias OFF n Sigma [n = 3.00] OFF



| | | | |
|-----------------|---|---------|-------|
| N. D. D. | : | 36/1024 | |
| Average Vel. | : | 0.0714 | [m/s] |
| Standard Dev. | : | 0.0711 | [m/s] |
| Turbulence Int. | : | 99.4911 | [%] |
| Skewness Factor | : | 1.5705 | |
| Flatness Factor | : | 12.8327 | |
| Max. Vel. | : | 0.3304 | [m/s] |
| Min. Vel. | : | 0.0318 | [m/s] |

<F1>COMMAND <Q>QUIT

รูปที่ 4 แสดงความเร็วของอนุภาคที่วัด ณ จุด c ตามรูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ในส่วนของการบันทึกภาพการไหล

จากผลการบันทึกภาพการไหลโดยบันทึกจากการทดสอบการไหลที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่าง ๆ ภาพที่ได้จากการทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์สูงกว่า 400 rev/min ไม่สามารถที่จะมองเห็นลักษณะการไหลได้ เนื่องจากกล้อง VDO ที่ใช้บันทึกมีความเร็วต่ำเกินไป ส่วนภาพที่ได้จากการทดสอบที่ความเร็วรอบต่ำมาก (น้อยกว่า 100 rev/min) สามารถที่จะมองเห็นการไหลได้ ซึ่งในการทดสอบที่ความเร็วรอบต่ำมากนี้ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะไม่คงที่ และอนุภาคที่ไหลเข้ามาในกระบอกสูบจะมีความเร็วต่ำ ดังนั้นภาพที่ได้จึงไม่สามารถบอกลักษณะการไหลได้อย่างชัดเจนนัก แต่อย่างไรก็ตามภาพที่ได้จากการทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่ำนี้ยังคงแสดงให้เห็นว่าการไหลหมุนวนเกิดขึ้น

2. ส่วนของการวัดความเร็วอนุภาค

การวัดความเร็วอนุภาค โดยใช้แป้งฝุ่นเป็นอนุภาค และใช้ FLV เป็นเครื่องมือวัดความเร็วของอนุภาค สามารถที่จะวัดความเร็วของอนุภาคที่จุดต่าง ๆ ของการไหลได้ และจากผลการบันทึกความเร็วจะเห็นว่า ที่จุด a ดังรูป ความเร็วที่วัดได้มีค่าสูงสุด เนื่องจากที่จุด a อยู่ใกล้ลิ้นไอศีมกและอยู่ในแนวที่อนุภาคพุ่งเข้ามา ในจังหวะดูด เมื่ออนุภาคไหลเข้ามาในท่อไอศีมกและผ่านวาล์วไอศีมกเข้ามาในห้องเผาไหม้ ในช่วงที่ผ่านวาล์ว พื้นที่หน้าตัดของการไหลจะมีค่าน้อย ทำให้อนุภาคที่ไหลพุ่งเข้ามาในห้องเผาไหม้มีความเร็วสูง ซึ่งจุด a อยู่ตรงทางเข้าของไอศีมก ดังนั้นจึงมีความเร็วสูงสุด ส่วนในบริเวณใกล้ลิ้นไอศีมกและบริเวณมุมอับของห้องเผาไหม้ ซึ่งเป็นจุดอับ การไหลในบริเวณนี้เกิดจากความเฉื่อยในการไหลเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นความเร็วที่บริเวณนี้จึงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น แสดงให้เห็นจากผลการทดลองวัดที่จุด b ซึ่งมีความเร็วต่ำสุด

ในการไหลพุ่งเข้าด้วยความเร็วสูงของแก๊สในจังหวะดูด ทำให้ของไหลที่พุ่งเข้ามานั้นมีโมเมนตัมสูง และเกิดการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่จุดต่าง ๆ ในกระบอกสูบ ดังนั้นการถ่ายเทโมเมนตัมเป็น factor หนึ่งสำหรับการไหลในห้องเผาไหม้ จากผลการทดลองการวัดความเร็วที่จุด c มีค่าสูงแต่น้อยกว่าที่จุด a และมีค่ามากกว่าที่จุด b ความเร็วของการไหลที่จุด c นี้ เกิดจากการถ่ายเทโมเมนตัมเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามความเฉื่อยก็มีผลต่อการไหลในบริเวณนี้ด้วย

การไหลที่จุดต่าง ๆ ในกระบอกสูบจะมีความเร็วต่าง ๆ กัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การถ่ายเทโมเมนตัมและความเฉื่อยในการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ข้อผิดพลาดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการทดลอง

1. ในการบันทึกภาพการไหลที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่าง ๆ จะเห็นว่าที่ความเร็วรอบต่ำมาก ๆ สามารถมองเห็นการไหลของอนุภาคได้ แต่สำหรับในการทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์สูงขึ้น ภาพที่ได้จะแสดงผลไม่ชัดเจน เนื่องจากความเร็วในการจับภาพของกล้องวีดีโอที่ใช้ต่ำมาก ดังนั้นการถ่ายภาพการไหลในกระบอกสูบจำเป็นต้องใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (Rapid Camera)
2. ในการทดลองแต่ละครั้ง เมื่อเครื่องยนต์ทำงานไปได้ระยะเวลาหนึ่ง กระบอกสูบสีที่ทำจากเรซินซึ่งเป็วัสดุที่มีความแข็งน้อย จะมีรอยขีดข่วนเกิดขึ้น เนื่องจากการเคลื่อนที่ขึ้นลงของลูก ซึ่งมีส่วนทำให้ภาพที่ถ่ายไม่ชัดเจน ฉะนั้นในการทดลองแต่ละครั้งจึงต้องถอดกระบอกสูบออกมาขัดใหม่ เพื่อให้กระบอกสูบมีความใสอยู่เสมอ
3. การวัดความเร็วอนุภาคโดย FLV Laser ที่ยิงผ่านเข้าไปในกระบอกสูบเพื่อทำการวัดความเร็วจะมีการหักเหเล็กน้อย ซึ่งจะมีผลต่อความผิดพลาดของข้อมูล
4. หน้าที่ของอนุภาคมีผลกระทบต่อการไหลของอนุภาคในอากาศ ทำให้ข้อมูลที่วัดได้นั้นมีข้อผิดพลาดไปบ้าง ดังนั้นในการทดสอบจึงควรใช้อนุภาคที่เบา เพื่อให้เกิดข้อผิดพลาดน้อยที่สุด

บทสรุป

การสังเกตการณ์ไหลในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ 4 จังหวะ โดยการถ่ายภาพการไหลของอนุภาคทางด้านข้างของกระบอกสูบที่ได้จำลองขึ้นเพื่อการทดลองนี้ และวัดความเร็วของอนุภาคที่ไหลในกระบอกสูบ โดยใช้ FLV เป็นเครื่องมือวัด ภาพที่ถ่ายมาได้จากการทดลองที่ได้ไม่สามารถแสดงให้เห็นทิศทางการไหลของอนุภาคได้ เนื่องจากความเร็วในการบันทึกภาพของกล้องวีดีโอต่ำเกินไป จึงจับภาพการไหลได้ไม่ทัน ดังนั้นในการบันทึกภาพการไหลจึงจำเป็นต้องใช้กล้องถ่ายภาพที่มีความเร็วสูง ส่วนในการวัดความเร็วของอนุภาคสามารถวัดได้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในกระบอกสูบ แต่ความเร็วที่วัดได้จะมีความผิดพลาดอยู่บ้าง เนื่องจาก อนุภาคที่ใช้ในการวัดเป็นอนุภาคที่มีน้ำหนักซึ่งมีผลต่อการไหลของอนุภาคในอากาศ จากผลการทดลองจึงสามารถวิเคราะห์การไหลได้เฉพาะในส่วนความเร็วของการไหลในกระบอกสูบเท่านั้น ซึ่งจะเห็นว่าความเร็วของการไหลที่จุดต่าง ๆ มีค่าต่างกัน โดยที่ทางเข้าของไอดีจะมีความเร็วมากที่สุด และที่จุดอับ เช่น ใต้ลิ้นไอดีและบริเวณมุมของผนังห้องเผาไหม้ จะมีความเร็วต่ำมากเมื่อเทียบกับที่จุดอื่นในห้องเผาไหม้ ทั้งนี้เนื่องจากการเนือน และการถ่ายเทโมเมนตัมของการไหลพุ่ง เข้าของไอดี

หนังสืออ้างอิง

1. YasuHiko Iwamoto, Yoshiaki Danno, Osamu hirako, Toyoaki, Fukui and Nobuaki Murakami, "The 1.5 liter Vertical vortex engine" SAE paper 920670,1992.
2. Tadayoshi Hirotoomi, Isao Nagayama, and Shoji Kobayashi (Nissan),"Study of Induction Swirl in a Spark Ignition Engine" SAE paper 810496,1981.
3. Yohiko Koyota, Katsu Akishino, and Hiromitsu Ando, "Concept of Lean Combustion by Barrel-Stratification"SAE paper 92678,1992.