

การออกแบบและพัฒนาแคร้งชาร์ฟและแคมชาร์ฟอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องยนต์ปั๊ม Design and Development Electronic Crankshaft and Camshaft of an Engine Pump

เจตนากร ศรีทอง และ ปิโยรส จิระวัฒนา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002
โทรศัพท์ +066-43-244296, โทรสาร +66-43-245878, E-mail: cb400kku@hotmail.com, piyoro@kku.ac.th

Jettanakorn Sritong and Piyoros Jirawattana

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kean University, Khon Kean, 40002, Thailand.,
Tel: +66-43-244296, Fax: +66-43-245878, E-mail: cb400kku@hotmail.com, piyoro@kku.ac.th

บทคัดย่อ

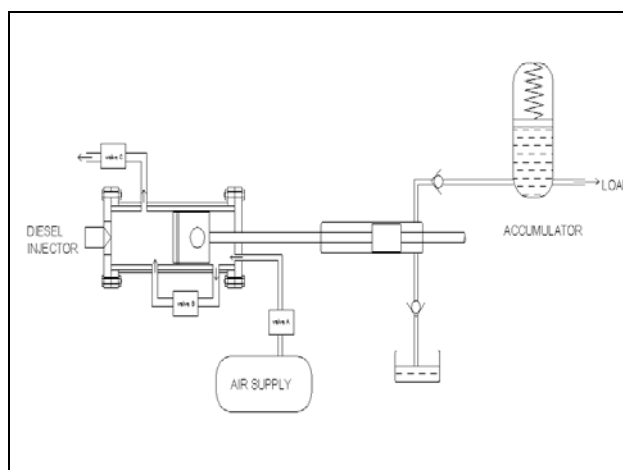
งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงการควบคุมตำแหน่งศูนย์ตายบนและศูนย์ตายล่างของลูกสูบในเครื่องยนต์ลูกสูบอิสระเพื่อให้ได้พารามิเตอร์ต่างๆ จากในรอบเดียวกันมาใช้ในการควบคุมระบบ โดยเลือกใช้วิธี Model reference control (MRC) โดยพารามิเตอร์ดังกล่าวได้มาจากแบบจำลอง ซึ่งเคลื่อนที่ไปพร้อมกับระบบ ซึ่งโดยทั่วไปนั้นจะใช้การควบคุมแบบ PID ทำให้ต้องนำค่าศูนย์ตายบนและศูนย์ตายล่างของการทำงานในรอบที่แล้วมาใช้ในการควบคุมในรอบปัจจุบัน ในงานวิจัยจะแสดงวิธีการควบคุมแบบ MRC ผลการควบคุมตำแหน่งและแบบจำลองเครื่องยนต์ลูกสูบอิสระ

Abstract

The objective of this work is to improve the control for the dead center (TDC) and bottom dead center (BDC) of the piston in a free piston engine (FPE). From this improvement, the necessary parameters, which are evaluated from a model that moves simultaneously with the system, are obtained to control the system in the same cycle. Therefore, a model reference control (MRC) method is selected to use in the system. In general, the controls of TDC and BDC values in previous cycle have to use to control the present cycle. This work describes the MRC method to control the system. In addition, the results of displacement control and FPE model are also included.

บทนำ

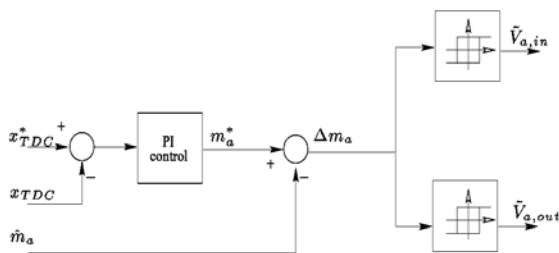
เครื่องยนต์ลูกสูบอิสระนั้นจะไม่มีกลไกในการควบคุมตำแหน่งเซนในเครื่องยนต์ปกติ ดังนั้นการจัด ความเร็ว และความเร่งของลูกสูบจึงขึ้นอยู่กับแรงที่เกิดจากการจุดระเบิด หรือแรงจากถังเก็บความดันในขบวนการ rebound จากลักษณะทางจลนศาสตร์ และการใช้ล้อตุ่นกำลังทำให้ปริมาณทางจลนศาสตร์เหล่านี้มีลักษณะเป็น sinusoidal ตลอดการเคลื่อนที่จาก TDC ถึง BDC เครื่องยนต์ปกติจึงมีประสิทธิภาพในการเก็บพลังงานศักย์ไว้เพื่อใช้ในจังหวะคายได้ดีกว่า (สำหรับแบบ 4 จังหวะเพื่อการสันดาปที่มีประสิทธิภาพมากกว่า) การนำพลังงานจากถังสำรองความดันกลับมาใช้ของเครื่องยนต์ลูกสูบอิสระเพื่อให้อากาศเสีย



รูปที่ 1 เครื่องยนต์ปั๊มแบบลูกสูบอิสระ

อย่างไรก็ตามเครื่องยนต์ลูกสูบอิสระแบบสองจังหวะสามารถออกแบบสามารถออกแบบให้มีประสิทธิภาพในการสันดาปที่ได้ด้วยเหตุที่ลูกสูบสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังจะได้อธิบายต่อไป

การทำงานของเครื่องยนต์ลูกสูบอิสระจำเป็นต้องใช้การควบคุมตำแหน่งศูนย์ตายล่างและศูนย์ตายบนเพื่อไม่ให้ลูกสูบเคลื่อนที่ชนกับฝาสูบซึ่งที่ผ่านมานิยมใช้การควบคุมแบบ PID ซึ่งจะนำค่า TDC,BDC จาก supervisory control มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองเพื่อหา error แล้วส่งไปคำนวณหาค่ามวลของอากาศและน้ำมันดีเซลเพื่อนำไปใช้ในรอบต่อไปเพราะในจังหวะการดันกลับหลังจากที่วาล์วอากาศปิด อากาศภายในกระบอกสูบจะขยายตัวดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่โดยไม่สามารถควบคุมได้เช่นเดียวกับในจังหวะการจุดระเบิดหลังจากการฉีดน้ำมันดีเซล ดังนั้นการควบคุมแบบ PID จึงจำเป็นต้องนำค่าต่างๆการรอบก่อนหน้ามาใช้ในการควบคุมตำแหน่งในรอบต่อไป งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวคิดด้านการควบคุมตำแหน่งของลูกสูบเครื่องยนต์ลูกสูบอิสระโดยใช้ Model reference control ซึ่งวิธีนี้จะนำค่าต่างๆ ที่จำเป็นในรอบการทำงานเดียวกันจาก model มาควบคุม plant ซึ่งได้แสดงอยู่ในส่วนของการควบคุม

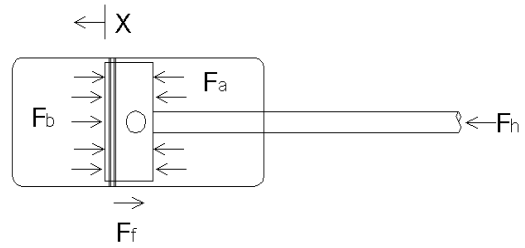


รูปที่ 2 การควบคุมตำแหน่งศูนย์ตายบนแบบ PID

พลศาสตร์ของลูกสูบ

เครื่องยนต์ลูกสูบอิสระคือเครื่องยนต์ที่นำเอางานจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบมาใช้โดยตรงโดยไม่ต้องเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปเป็นแบบหมุน ลูกสูบของเครื่องยนต์ลูกสูบอิสระจะมีเพลาลูกสูบกับลูกสูบของปั๊มไฮดรอลิกส์ แรงที่ได้จากการจุดระเบิดจะทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง แรงนั้นจะถูกส่งไปยังลูกสูบของปั๊มไฮดรอลิกส์โดยตรงเพื่อสร้างความดันไฮดรอลิกส์ออกมาใช้งาน เนื่องจากเครื่องยนต์ลูกสูบอิสระไม่มีเพลาลูกสูบเหมือนเครื่องยนต์โดยทั่วไป อัตราส่วนการอัด (Compression ratio , r_c) จึงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เมื่ออัตราส่วนการอัดเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มขึ้น การทำงานของเครื่องยนต์ลูกสูบอิสระแบบ Single Piston ลูกสูบใหญ่ทางซ้ายจะเป็นลูกสูบ Combustion ส่วนลูกสูบเล็กทางขวาจะเป็นปั๊มไฮดรอลิกส์ การทำงานของ Single Piston จะเริ่มที่ขั้นตอนการจุดระเบิด แรงจากการระเบิดและการขยายตัวของอากาศจะถูกส่งไปยังลูกสูบของปั๊มโดยเพลาลูกสูบ น้ำมันไฮดรอลิกส์จะถูกอัดเข้าไปเก็บในถังความดัน เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนลูกสูบจะอยู่ที่ศูนย์ตายล่าง ต่อจากนี้จะต้องมีแรงที่จะมาดันลูกสูบกลับ (ขั้นตอนการอัดอากาศ) เพื่อให้การทำงานครบวัฏจักร ซึ่ง

แรงดังกล่าวจะใช้จากแรงดันไฮดรอลิกส์ การควบคุมระยะการเคลื่อนที่ที่สามารถทำได้โดยควบคุมแรงดันไฮดรอลิกส์ที่ใส่เข้าไปซึ่งจะสังเกตได้ว่าการเคลื่อนที่ของชุดลูกสูบและก้านสูบจะเป็นอิสระโดยจะทำงาน



คล้ายคลึงกับระบบ mass spring damper ซึ่งจะแตกต่างจากในเครื่องยนต์ธรรมดาที่มีเพลาลูกสูบซึ่งมีเพลาลูกสูบกับการเคลื่อนที่

ลูกสูบของเครื่องยนต์ลูกสูบอิสระจะทำหน้าที่ในการอัดน้ำมันไฮดรอลิกส์ออกไปที่ด้านความดันสูงโดยตรงดังนั้นการออกแบบจึงใช้หลักการของเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากให้แรงอัดได้สูงกว่า โดยที่แบบ 2 จังหวะจะมีความเหมาะสมกับเครื่องยนต์อิสระมากกว่า

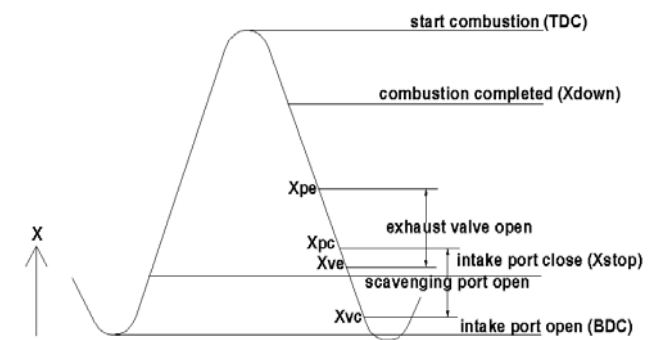
รูปที่ 3 แรงที่กระทำบนลูกสูบ

- P_b คือความดันดันจากการอัดอากาศในห้องเผาไหม้
- P_a คือความดันใช้ในการดันลูกสูบกลับ
- F_f คือแรงเสียดทานระหว่างลูกสูบกับผนังกระบอกสูบ
- F_h คือภาระไฮดรอลิกส์กำหนดให้เป็นความดันคงที่
- A_a คือพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบด้านดันกลับ
- A_b คือพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบด้านจุดระเบิด
- X คือระยะการเคลื่อนที่ของลูกสูบ

จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตันสมการสมดุลแรงทั้งสองด้าน

$$\sum F = ma \quad (1)$$

$$m \ddot{x} = -p_a A_a + p_b A_b - F_h - F_f \quad (2)$$



รูปที่ 4 ตำแหน่งควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์

สมการพลังงาน

ในการหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของอากาศในกระบอกสูบจะ
ใช้การสมดุลพลังงานดังสมการข้างล่าง

$$m_a c_v \frac{dT_a}{dt} = \dot{m}_a c_p T_p - \dot{m}_a c_v T_a + A_a P_a \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

$$m_b c_v \frac{dT_b}{dt} = \dot{m}_b c_p T_a - \dot{m}_b c_v T_b - A_b P_b \frac{dx}{dt} + h_d \dot{m}_d \quad (4)$$

อัตราการใช้

อัตราการใช้ของอากาศผ่านวาล์วจะอยู่บนสมมติฐานการใช้
แบบไอเซนทรอปิก ซึ่งกำหนดให้ เป็นความดันด้านหน้าและ เป็น
ความดันด้านหลัง อัตราการใช้ของอากาศผ่านวาล์วควบคุมแสดงดัง
สมการข้างล่าง

$$\dot{m} = \begin{cases} A \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_1 \rho_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} & P_2 > P_c \\ A \sqrt{k P_1 \rho_1 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} & P_2 \leq P_c \end{cases} \quad (5)$$

ความดันวิกฤตหาได้จาก

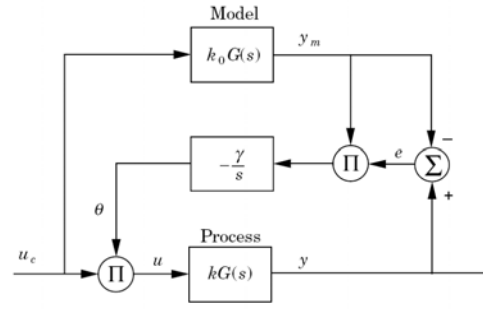
$$P_c = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{5}{k-1}} P_1 \quad (6)$$

โดยที่ $k = c_p / c_v$ และความหนาแน่นของก๊าซหาได้จาก

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (7)$$

การควบคุม

จากความสัมพันธ์สมการพลังงานเมื่อนำไปสร้างแบบจำลองแล้ว
ทำการทดสอบได้ผลคือ ปริมาณ $\dot{m}_a$ จะมีผลต่อ X_{TDC} มากกว่า
 X_{BDC} และปริมาณ $\dot{m}_d$ จะมีผลต่อ X_{BDC} มากกว่า X_{TDC} ดังนั้น
แนวคิดพื้นฐานของการควบคุมตำแหน่งศูนย์ตายบนคือการปรับ
ปริมาณอากาศใน air cushion และการควบคุมตำแหน่งศูนย์ตายล่างคือ
ปรับปริมาณน้ำมันที่ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ในแต่ละวัฏจักรโดยใช้
Model reference control



รูปที่ 5 model reference control

การควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการควบคุมเพื่อชด
เชยมวลของอากาศและน้ำมันดีเซลเนื่องจากความแตกต่างระหว่าง
model กับ plant ส่วนที่สองคือการควบคุมตำแหน่งศูนย์ตายบนและ
ศูนย์ตายล่าง โดยทั้งสองส่วนจะทำงานสัมพันธ์กัน

การควบคุมเพื่อชดเชยปริมาณอากาศและน้ำมันดีเซลเนื่องจากใน
คุณลักษณะของวาล์วใน model จะเป็น proportional valve ซึ่งจะแตก
ต่างจากวาล์วใน plant จะเป็น nonlinear valve ส่วนควบคุมทำการ
เปรียบเทียบปริมาณของอากาศและน้ำมันดีเซลระหว่าง model กับ
plant แล้วนำมาคำนวณเพื่อหาตำแหน่งการปิดวาล์วและตำแหน่งการ
หยุดฉีดน้ำมันใหม่เพื่อชดเชยมวลของอากาศและน้ำมันดีเซลให้เท่ากับ
ใน model โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

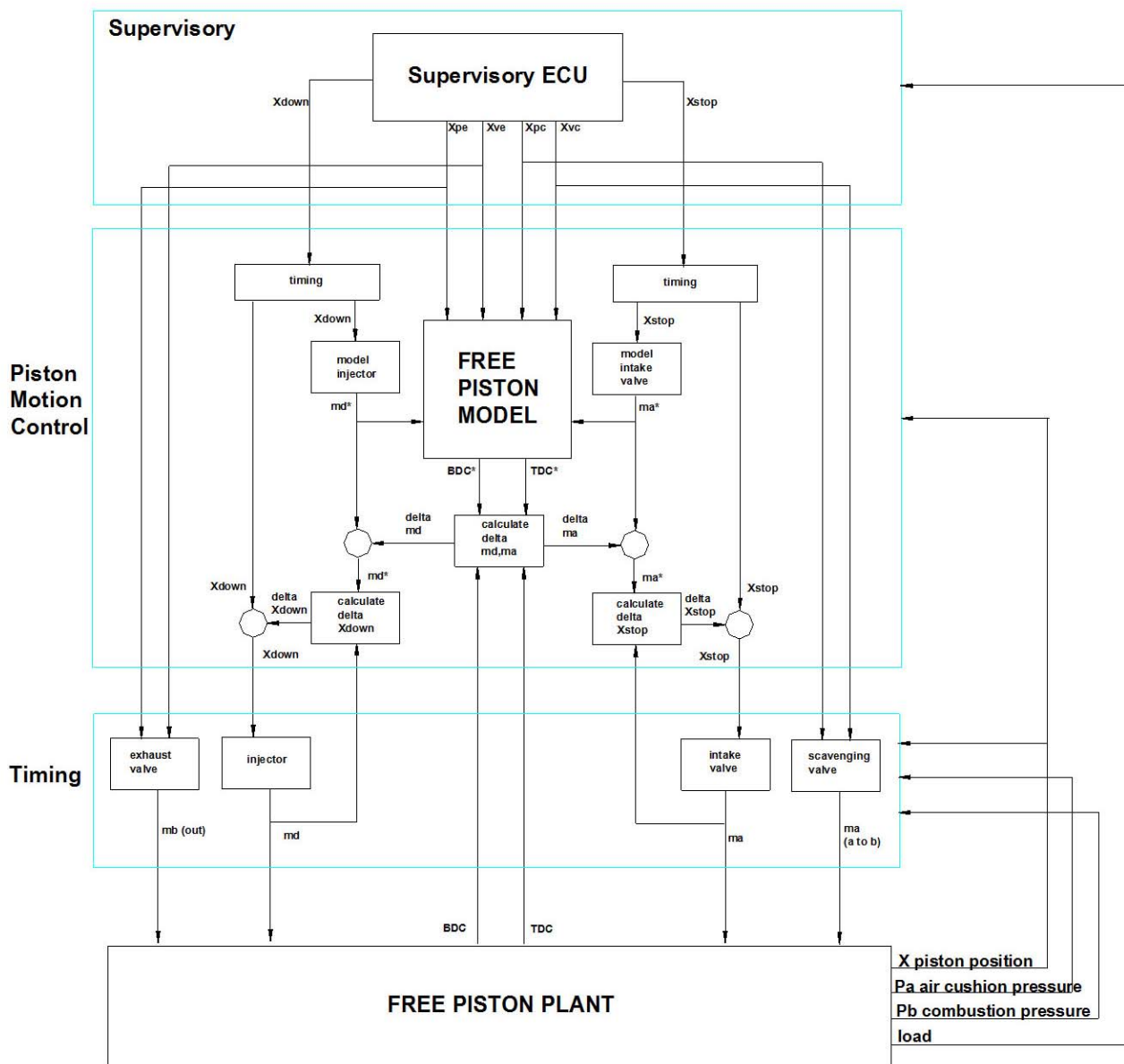
$$X_{down}^* = X_{down} + \frac{m_{dm} - m_{dp}}{4.286 \dot{m}_{dp}} \quad (8)$$

$$X_{stop}^* = \frac{\sqrt{\frac{m_{am} - m_{ap}}{4.126} + (4.286 X_{stop})^2}}{4.268} \quad (9)$$

การควบคุมตำแหน่งศูนย์ตายบนและศูนย์ตายล่างเนื่องจากค่า
ต่างๆ ระหว่าง model กับ plant ไม่เท่ากันเช่น แรงเสียดทาน จึงทำให้
การเคลื่อนที่ของลูกสูบไม่เท่ากัน ส่วนควบคุมจะทำการเปรียบเทียบ
ตำแหน่งศูนย์ตายบนและศูนย์ตายล่างระหว่าง model กับ plant แล้วนำ
มาคำนวณเพื่อหามวลของอากาศและน้ำมันดีเซลใหม่ที่ทำได้
ตำแหน่งศูนย์ตายบนและศูนย์ตายล่างเท่ากับใน model โดยใช้ความ
สัมพันธ์ดังนี้

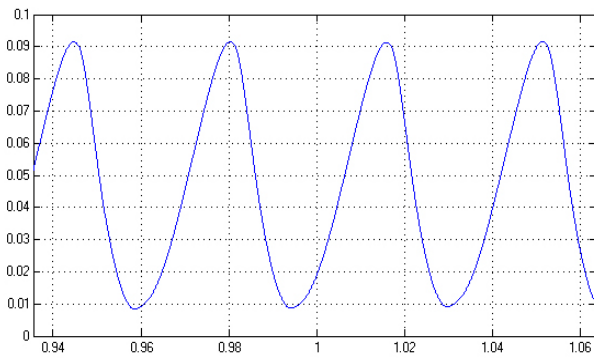
$$\Delta m_d h_d = \Delta X_{BDC} (P_a^{BDC} A_a - P_b^{BDC} A_b) \quad (10)$$

$$c_v \dot{T} \Delta m_a = \Delta X_{TDC} (P_b^{TDC} A_b - P_a^{TDC} A_a) \quad (11)$$

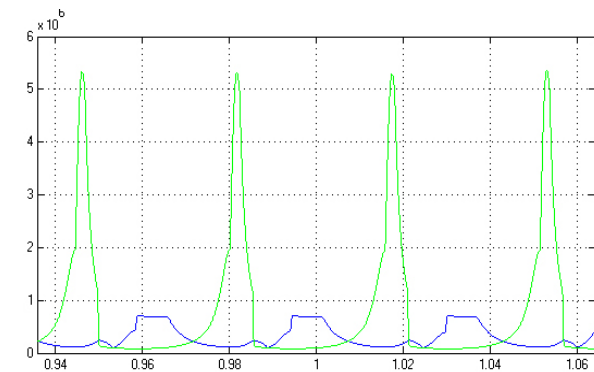


รูปที่ 6 โครงสร้างของระบบ

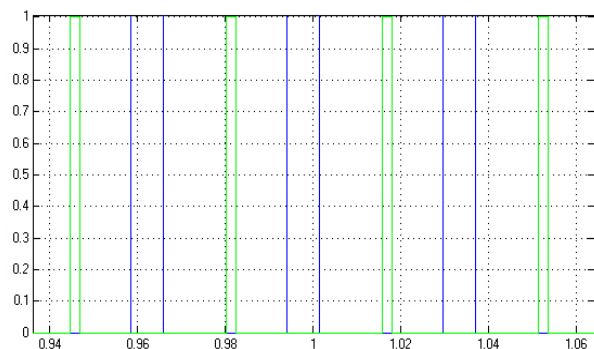
ผลการทดลอง



A. การเคลื่อนที่ของลูกสูบ



B. สัญญาณหัวฉีด (เขียว) วาล์วอากาศ (น้ำเงิน)

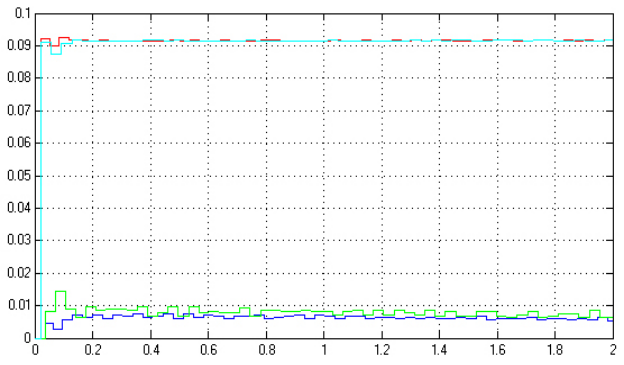


C. ความดันในห้องเผาไหม้ (เขียว) ห้องดันกลับ (น้ำเงิน)

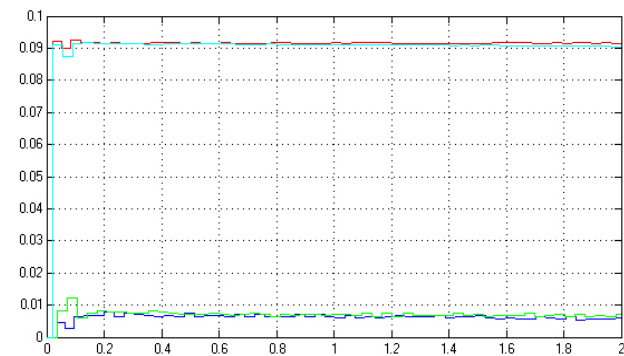
รูปที่ 7 พารามิเตอร์จากแบบจำลอง

กำหนดให้ลูกสูบของเครื่องยนต์ลูกสูบอิสระมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ช่วงชัก 10 เซนติเมตร ลูกสูบไฮดรอลิกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 เซนติเมตร ความดันที่ใช้ในห้องดันกลับ 7 bar รับภาระไฮดรอลิกสัปดาห์ละหนึ่ง จากรูปที่ 7 แสดงถึงการเคลื่อนที่ของลูกสูบ สัญญาณ และความดันที่ความถี่ประมาณ 33 Hz

รูปที่ 8 แสดง TDC , BDC ของ model และ plant โดยในรูป 8A ไม่ได้ทำการควบคุมและผลของการควบคุมแสดงไว้ที่รูป 8B



A. ไม่ได้ควบคุม



B. model reference control

รูปที่ 8 TDC,BDC ของ model และ plant

TDCmodel (แดง),TDCplant(ฟ้า),BDCmodel (น้ำเงิน),BDCplant(เขียว)

สรุป

งานวิจัยได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการควบคุมตำแหน่ง ศูนย์ตายบนศูนย์ตายล่างของเครื่องยนต์ลูกสูบอิสระโดยใช้ model reference control ทำให้สามารถนำค่าต่างๆ ที่จำเป็นต่อการควบคุม จาก model มาใช้ใน plant ในรอบเดียวกัน

ข้อเสนอแนะ

ในการควบคุมตำแหน่งของลูกสูบแบบ model reference control จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสร้าง model ให้มีความแม่นยำตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Constant Pressure Engines, Inc, <http://www.constant-pressure.com/Home.htm> , Lakeland, Florida , April 2-8, 2003.
2. Arshad W. M., Bäckström T., and Sadarangani C., Evaluation of different electrical machine possibilities for an integrated free-piston generator, Approved for presentation at the 19th Electrical Vehicle Symposium (EVS), Korea, October 2002.
3. Tor A. Johansen , Olav Egeland , Erling Aa. Lohannessen and Rolf Kvamsdal , *Free-Piston Diesel*

Engine Dynamics and Control , Postboks 169 , N-1325
Lysaker , Sci. Tech. , N-7491 Trondheim , Norway ,
2001

4. Peter A. J. Achten, Johan P.J. van den Oever, Jeroen Potma, and Georges E. M. Vael, *Design of a hydraulic free-piston engine* ,
<http://www.digitalcar.sae.org/ohmag/features/freepiston/index.htm> , Innas BV , 2000 ,
5. Professor pro tem Martti Larmi , Pulse Two - Performance of a Hydraulic Free Piston Engine , Research Projects , Helsinki University of Technology Internal Combustion Engine Laboratory ,
http://www.hut.fi/Yksikot/Moottori/M/research/Pulse_Two.html ,1999
6. F.J. Fronczak and N.H. Beachley , Pump/Motor Displacement Control Using High-Speed On/Off Valves , SAE Paper 15096-0001. U.S.A. , 1998
7. P. A. J. Achten, "A review of free piston engine concepts" , in SAE Paper 941776, 1994
8. W.J. Thayer , Transfer Functions For MOOG Servovalves , Technical Bulletin 108 , December 1958 , Rev. January 1965
9. V GANESAN , Internal Combustion Engine , ISBN 0-07-462122-X , McGraw-Hill 1999