



อิทธิพลของช่วงเวลาและความดันในการฉีดเชื้อเพลิงปาล์มไบโอดีเซล ในระบบฉีดเชื้อเพลิงดีเซลแบบรางรวม

Influence of Injection Energizing Duration and Injection Pressure for Palm Biodiesel in Common-rail Fuel Injection System

ประธาน ศรีชัย¹

Prathan Srichai¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลของการวัดอัตราการฉีดเชื้อเพลิงด้วยหัวฉีดน้ำมันดีเซลควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ความดันสูงระบบรางรวม (คอมมอนเรล) ที่เงื่อนไขความดันในการฉีดเชื้อเพลิงจำลองการทำงานเงื่อนไขของเครื่องยนต์ดีเซล วัดปริมาณการฉีดด้วยโดยวิธี Zeuch ของเชื้อเพลิงดีเซลและปาล์มไบโอดีเซล การทดลองได้มีจุดประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลของช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงและความดันในการฉีดเชื้อเพลิง โดยศึกษาตัวแปร ได้แก่ อัตราการฉีดเชื้อเพลิง ค่าพลังงานที่ได้จากการฉีดเชื้อเพลิง ค่าความเร็วเฉลี่ยของการฉีดเชื้อเพลิง และเลขเรย์โนลด์ส

จากผลการทดลอง พบว่า การเพิ่มช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงส่งผลทำให้ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นแต่เมื่อความดันในการฉีดเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงที่มากกว่าผลของช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิง ส่วนผลของเชื้อเพลิงพบว่า ปริมาณการฉีด ค่าพลังงานความร้อน ค่าความเร็วเฉลี่ยในการฉีดเชื้อเพลิง และ เลขเรย์โนลด์สของเชื้อเพลิงปาล์มไบโอดีเซลมีค่าน้อยกว่าดีเซล เนื่องจากค่าความหนืดของปาล์มไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการต้านทานการไหลของเชื้อเพลิงและส่งผลทำให้ผลของการจ่ายเชื้อเพลิงลดลงตาม วิธีการแก้ไขปริมาณเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่ลดลงโดยการเพิ่มความดันในการฉีดเชื้อเพลิงเพื่อลดแรงต้านของการฉีดเชื้อเพลิง

คำสำคัญ: อัตราการฉีดเชื้อเพลิง หัวฉีดคอมมอนเรล ความดันในการฉีดเชื้อเพลิง ช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิง

Abstract

This research presents fuel injection rate measurement with high pressure diesel injection system (Common Rail) at fuel injection pressure simulated real engine conditions. The investigation of relationship between fuel injection rate for diesel and palm biodiesel was studied by Zeuch's method. This work aims to study influence of energizing duration and fuel injection pressure with results injection rate, energy contents, average speed and Reynolds number.

The results showed that increase fuel injection timing results in increased fuel injection, but as the fuel injection pressure increases, the injection volume is greater than the fuel injection time. The lower energy content of biodiesel due to lower fuel heating value and injection quantity. The average fuel injection rate and the Reynolds number of palm biodiesel are less than those of diesel due to increased viscosity of palm biodiesel. The fuel flow resistance and consequently the effect of fuel dispersion decreases.

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

¹ Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

The way to reduce the amount of biodiesel fuel has done by increasing the fuel injection pressure to reduce the fuel injection resistance.

Keywords: Injection rate, Commonrail injector, Fuel injection pressure, Injection duration

บทนำ

ในปัจจุบันโลกของเราได้ประสบกับปัญหาการแปรปรวนของเชื้อเพลิงที่ใช้กับเครื่องยนต์ สังเกตได้จากอัตราการใช้พลังงานต่อวันของแต่ละประเทศเทียบกับความสามารถในการผลิตซึ่งพบว่าโดยส่วนมากจะมีอัตราการใช้ที่ค่อนข้างสูงกว่าความสามารถในการผลิต ดังภาพที่ 1 ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดวิกฤติพลังงานได้ จึงทำให้มีการคิดค้นหาแหล่งพลังงานทดแทนมาใช้แทนแหล่งพลังงานฟอสซิล

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับยานยนต์ โดยมีปาล์มไบโอดีเซลเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้เป็นพลังงานทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล



ภาพที่ 1 การใช้ดีเซลรวมต่อวัน (Thammnaomai, 2018)

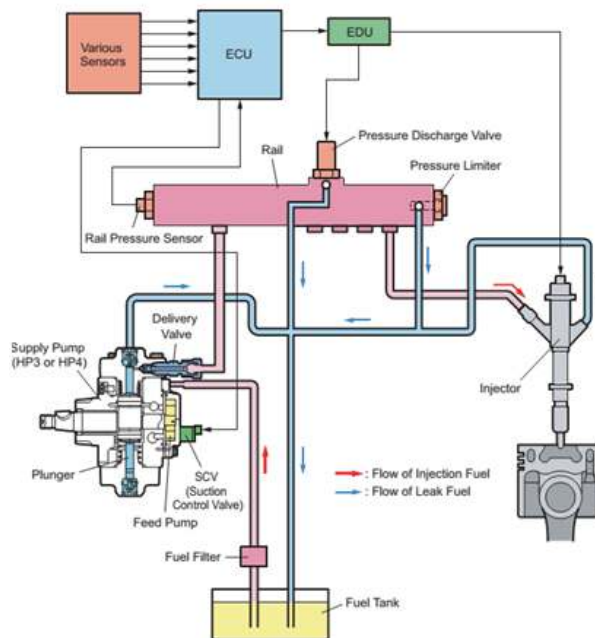
การวัดปริมาณอัตราการฉีดของเชื้อเพลิงนั้นได้ถูกนำมาใช้ในการทดลองเพื่อวัดค่าปริมาณการฉีดของเชื้อเพลิงซึ่งสามารถที่จะนำมาใช้ในการปรับปรุงเครื่องยนต์เมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงทางเลือกชนิดใหม่เพราะในเชื้อเพลิงแต่ละชนิดย่อมมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ต่างกัน เมื่อมีคุณสมบัติที่ต่างกันปริมาณในการฉีดเชื้อเพลิงย่อมต่างกัน จึงอาจส่งผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์ได้

ในปัจจุบันในระบบหัวฉีดของเครื่องยนต์ดีเซลใช้เป็นระบบคอมมอนเรลซึ่งมีการใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาควบคุมการฉีดของหัวฉีดเพื่อให้ระบบหัวฉีดมีประสิทธิภาพและความแม่นยำในการทำงานที่ดีขึ้นโดยการควบคุมความดันและปริมาณในการฉีดซึ่งการพัฒนานี้มีผลช่วยในเรื่องของการลดเสียงและการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ รวมไปถึงการลดปริมาณเขม่าและไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยไปเป็นมลพิษในอากาศด้วย โดยทางผู้ผลิตรถยนต์ดีเซลในปัจจุบันสามารถผลิตสมองกลแบบฝังตัวหรือ Electronic Control Unit (ECU) ให้ความคุมการฉีดสูงอย่างน้อย 3 ครั้งต่อการฉีดเชื้อเพลิงในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ (Automotive Engineering, 2018) มีการฉีดเชื้อเพลิงพื้นฐานดังนี้ คือ การฉีดครั้งที่แรกเรียกว่า ฉีดนำร่อง (Pilot Injection) เป็นการฉีดเพื่อช่วยให้เชื้อเพลิงส่วนแรกผสมกับอากาศได้ดี โดยการเพิ่มความดันและอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ ครั้งที่สองเป็นการในช่วงกำลัง (Main Injection) โดยช่วงนี้เป็นช่วงทำให้เกิดเผาไหม้ในส่วนมากที่สุดเพื่อกำลังของเครื่องยนต์ ครั้งที่สามเป็นช่วงฉีดเพิ่มอุณหภูมิไอเสีย (Post Injection) เพื่อนำความร้อนไปเผาไหม้เขม่าที่ติดค้างเขม่าดีเซล (Diesel Particulate Filter, DPF) จะทำงานเมื่อกรองเขม่าเต็มระบบการฉีดเชื้อเพลิงแบบคอมมอนเรล มีข้อได้เปรียบในเรื่องความแม่นยำในการฉีดเชื้อเพลิง มากกว่าแบบหัวฉีดแบบกลไก (Mechanical pump) จึงได้เปรียบทางด้านประสิทธิภาพการประหยัดเชื้อเพลิง เสียงเงียบ และการสั่นสะเทือนที่ลดลง



ส่วนต่อไปนำเสนอ ระบบการฉีดเชื้อเพลิงแบบคอมมอลเรลหรือแบบรางร่วมแสดงผังการฉีดเชื้อเพลิงในภาพที่ 2 (Denso Australia, 2018) มีส่วนประกอบและการทำงานแก่ ชุดปั๊มความดันสูง (Supply pump) ทำหน้าที่ดูดเชื้อเพลิงจากถังเชื้อเพลิง (Fuel tank) และอัดเชื้อเพลิงความดันสูงด้วยลูกสูบแบบ Plunger การดูดผ่านการควบคุมความดันด้วยวาล์วจำกัดปริมาณการดูดเชื้อเพลิง (Suction control valve, SCV) จากนั้นเชื้อเพลิงความดันสูงจะส่งไปยังรางร่วม (Rail) เพื่อเป็นตัวเก็บสะสมน้ำมันก่อนที่จะจ่ายไปยังหัวฉีด (Injector) ในแต่ละสูบของเครื่องยนต์

การควบคุมช่วงเวลาการฉีดของเชื้อเพลิงโดยใช้สมองกลอิเล็กทรอนิกส์ (ECU) ที่รับรู้เงื่อนไขเริ่มต้นในการฉีดเชื้อเพลิง จากตัวรับรู้ของเครื่องยนต์ (Various Sensor) เช่น เซนเซอร์วัดองศาของเครื่องยนต์ เซนเซอร์วัดปริมาณอากาศ เซนเซอร์วัดตำแหน่งองศาของลิ้นปีกผีเสื้อ จากนั้น ECU จะตั้งช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงและส่งสัญญาณนั้นไปยัง (Electrical Driver Unit) EDU หรือชุดขับเคลื่อนหัวฉีดให้สร้างแรงเคลื่อนกระแสไฟฟ้าไปยกโซลินอยด์ให้หัวฉีดเกิดการยกตัวมีการฉีดเชื้อเพลิงออกมาผ่านช่องหัวฉีดส่งไปยังห้องเผาไหม้



ภาพที่ 2 ผังระบบการฉีดเชื้อเพลิงดีเซลแบบรางร่วม ที่มา; (Denso Australia, 2018)

งานวิจัยที่ผ่านมา

โดยคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลนั้นมีความแตกต่างกับดีเซลที่ใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าการไหลในระบบจ่ายเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ทำงานโดย (Pandey, Rehman & Pandey, 2012) พบว่า ส่งผลกระทบของจากเชื้อเพลิงจากความหนืดและความหนาแน่นต่ออัตราการฉีดได้มีงานวิจัยที่นำเสนอโดย Dermotte, Hespel, Foucher, Houillé & Mounaïm-Rousselle (2012) ที่ได้ทดสอบวัดปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงไบโอดีเซล จากเมล็ดธัญญาพืชผ่านกระบวนการทรานเอสเตอร์ (Rapeseed Methyl Ester, RME) และดีเซลด้วยวิธีอัตราการฉีดแบบ Zeuch และหัวฉีดแบบคอมมอลเรล พบว่า ความหนืดเพิ่มของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงและค่าสัมประสิทธิ์การฉีดเชื้อเพลิง (Discharge Coefficient, Cd) ในการฉีดเชื้อเพลิงลดลง ต่อมา มีงานวิจัยของ (Seykens, Somers & Baert, 2004) ที่ทำการศึกษาการฉีดเชื้อเพลิงของ (RME) พบว่า

ค่าโมดูลัสการอัดตัวของเชื้อเพลิง RME ที่สูงขึ้นทำให้กลไกการทำงานของระบบหัวฉีดแบบคอมมอนเรลมีการยกเข็มหัวฉีดที่ช้าและส่งผลอัตราการฉีดเชื้อเพลิงลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโมดูลัสการอัดตัวและความเร็วเสียงของไบโอดีเซลส่งผลกระทบเกี่ยวกับขั้นตอนการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง ได้ถูกรายงานโดย (Lee & Ofori-Boateng, 2013) เกี่ยวกับผลกระทบต่อความล่าช้าทางไฮดรอลิกส์และการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลาการฉีด ในกระบวนการที่หัวฉีดคอมมอนเรล ซึ่งการยกตัวเข็มหัวฉีดชั่วคราว (Transient) ของหัวฉีดเข็มโซลินอยด์ของไบโอดีเซลลดลงเนื่องจากโมดูลัสการอัดตัวของเชื้อเพลิงและความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลในระหว่างการเปิดชั่วคราว การฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันสูงในการฉีดเนื่องจากเปลี่ยนแปลงความดันของเชื้อเพลิงจนทำให้เกิดเปลี่ยนสถานะของน้ำมันเชื้อเพลิงหลังจากผ่านช่องรูหัวฉีด โดยพฤติกรรมการไหลนี้เรียกว่า Vena-contracta เกิดที่ผนังของหัวฉีดที่เปลี่ยนแปลงพื้นที่ของรูหน้าตัดการไหลให้ลดลงและส่งผลให้ปริมาณการฉีดของเชื้อเพลิงที่ลดลงการใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่ช่วยลดการเกิดโพรงอากาศ Cavitation ที่ทางเข้าของเชื้อเพลิงเนื่องจากความดันไอของเชื้อเพลิงต่ำกว่าความดันในการฉีดในช่วงระหว่างขั้นตอนการฉีดเชื้อเพลิงต่อมาผลต่างของความดัน ในการฉีดเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงลดลงเนื่องจากเกิดโพรงอากาศ (Cavitation) ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันเชื้อเพลิงหลังจากผ่านรูของหัวฉีด ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Vena-contracta ทางออกที่ลดพื้นที่ในการไหลและปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงที่ลดลงตาม รายงานวิจัยที่ผ่านมาของ Desantes, Payri, Salvador, & Gimeno (2003); Benajes, Pastor, Payri, R., & Plazas (2004); Payri, Bermúdez, Payri, & Salvador (2004); Siano (2010); Som, Longman, Ramirez, & Aggarwal (2010); Taşkıran, & Ergeneman (2011)

นอกจากนี้คุณสมบัติทางกายภาพของไบโอดีเซลทำให้ลักษณะการไหลมีกระทบต่อการไหลของเชื้อเพลิง จากความหนืดและความหนาแน่นต่ออัตราการฉีดได้ถูกรายงานจากงานวิจัยของ (Dernotte et al., 2012; Pandey et al., 2012) โดยความหนืดของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้ต้านทานการไหลและค่าสัมประสิทธิ์ในการฉีดเชื้อเพลิง (Discharge coefficient) ที่มีค่าลดลง นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นโมดูลัสการอัดตัวและความเร็วเสียงของไบโอดีเซลได้ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าของกลไกไฮดรอลิกส์ของหัวฉีดเชื้อเพลิงแบบคอมมอนเรล การยกตัวของเข็มหัวฉีด (Needle) เชื้อเพลิงและการเกิดเปลี่ยนแปลงในระยะเวลาการฉีด ในกระบวนการทำงานของหัวฉีดคอมมอนเรลโดยเฉพาะช่วงที่ทำให้การยกของเข็มหัวฉีดของโซลินอยด์ที่ใช้ไบโอดีเซลเนื่องจากโมดูลัสที่สูงและความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลทำให้ระยะเวลาการยกเข็มหัวฉีดลดลงและกระทบต่ออัตราการไหลในระหว่างการทำงานในช่วงเปิดของหัวฉีด จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ (Salvador, Gimeno, Morena, & Carreres, 2012); (Moon et al., 2014)

งานวิจัยของ (Han, Duan, Wang, Lin & Huang, Z., 2014) ได้ศึกษาตรวจสอบความล่าช้าในการฉีดปริมาณการฉีดและความแปรปรวนของความดันในการฉีดเชื้อเพลิง โดยใช้เชื้อเพลิงที่เป็นกรดไขมัน (ไบโอดีเซล) จากแหล่งที่มาที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่ามีความหนืดสูงของกรดไขมันก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความล่าช้าในการฉีดที่ความแปรปรวนของความดันในการฉีดและลดปริมาณการฉีดอันเนื่องมาจากความหนืดสูงซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิงและการใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่ช่วยลดการเกิดโพรงอากาศเริ่มก่อตัวในทางของหัวฉีดจากงานวิจัย (Som et al., 2010) เนื่องจากการเพิ่มของความหนืดที่ต้านการแยกตัวเป็นไอของเชื้อเพลิงและทำให้ปรากฏการณ์ Cavitation ลดลง

การปรับปรุงเพิ่มอัตราการไหลของหัวฉีดและการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การฉีดเชื้อเพลิงมีเทคนิคมากมายที่จะลดการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation) เช่น ในรูหัวฉีดแบบ (Conical) การขัดสีหัวฉีด (Abrasive flow Machining) หรือใช้หัวฉีดแบบรูหัวฉีดทรงกรวยในการเพิ่มปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงมากกว่าหัวฉีดทรงกระบอก (Cylindrical) จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Taşkıran & Ergeneman, 2011; Jung et al., 2008; Knefel, 2011; Payri et al., 2005)

การทดลองวัดปริมาณการฉีดของเชื้อเพลิงปาล์มไบโอดีเซลได้มีผลทดสอบผลของความดันของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น (Srichai et al., 2018) และพบว่าช่วงความดันเชื้อเพลิงในการฉีดที่เพิ่มขึ้นไม่ได้เป็นการเพิ่มปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงเนื่องมาจากผลของการความหนืดของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้น



ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงเป็นตัวแปรเริ่มต้นของการเริ่มการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน ซึ่งเป็นตัวแปรกำหนดเบื้องต้นในการของช่วงระยะเวลาการฉีดเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงไปไอดีเซลยังไม่มีผู้ที่ทดลองวัดผลการฉีดเชื้อเพลิง จึงได้เกิดแนวคิดริเริ่มในการทำการทดลองวิจัยนี้

วัตถุประสงค์การวิจัย

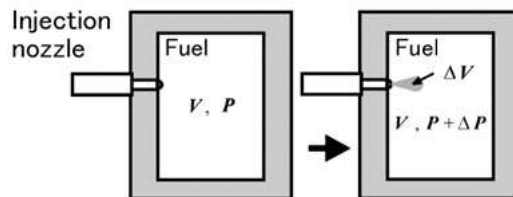
ศึกษาอิทธิพลการฉีดเชื้อเพลิงที่ความดันและช่วงเวลาในการฉีดของเชื้อเพลิงปาล์มไปไอดีเซลที่ใช้ระบบฉีดหัวฉีดเชื้อเพลิงแบบคอมมอลเรลและการศึกษาตัวแปรอื่นได้แก่ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิง ค่าพลังงานที่ได้จากการฉีดเชื้อเพลิง ความเร็วในการฉีดเชื้อเพลิง และเลขเรย์โนลด์ส

ระเบียบวิธีการวิจัย

เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของมีผลกระทบเชื้อเพลิงที่ใช้ มีความไม่เท่ากันของคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น ความหนืดจลน์ และ ค่าอื่นๆ ที่มีผลต่อการฉีดเชื้อเพลิงตลอดจนเผาไหม้ของเครื่องยนต์

1. การวัดปริมาณการฉีดแบบ Zeuch

เป็นวิธีการวัดปริมาณน้ำมันที่ฉีดโดยวิธีการใช้ห้องจำลองที่ใช้หัวฉีด (Injection nozzle) ฉีดเชื้อเพลิงไปในห้องที่มีปริมาตรคงที่ (Ishikawa et al., 2000) ที่บรรจุเชื้อเพลิงที่ต้องการทดสอบอยู่ภายใน การควบคุมความดันเริ่มต้น P ให้คงที่ตามที่สอดคล้องกับความดันในการทำงานของเครื่องยนต์การฉีดน้ำมันที่ต้องการวัดการฉีดเข้าไป จากนั้นสามารถหาคำนวนหาปริมาณที่ฉีดเข้าไปได้จากการวิเคราะห์ความดันที่เพิ่มขึ้น ΔP หรือ dP ภายในห้องทดลอง (Ishikawa et al, 2000) ดังภาพที่ 3 แสดงถึงการวัดปริมาณการฉีดของเชื้อเพลิง ซึ่งได้มีการใช้ค่าโมดูลัสการอัดตัว (K_s) มาคำนวณหาปริมาณการฉีดของเชื้อเพลิง



ภาพที่ 3 หลักการวัดด้วยวิธี Zeuch (Ishikawa et al, 2000)

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงปริมาตรคงที่ของห้องจำลองและโมดูลัสการอัดตัวของเชื้อเพลิงที่ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคงที่มีดังนี้

$$\Delta P_x = K_s \frac{\Delta V_x}{V_o} \quad (1)$$

เมื่อ ΔP_x คือ ความดันที่เปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิง (MPa)

ΔV_x คือ ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงของห้องจำลอง (m^3)

K_s คือ โมดูลัสการอัดตัวของเชื้อเพลิง วัดได้จากผลการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อความดัน

ที่ความดันเริ่มต้นในการฉีดเชื้อเพลิง (MPa)

V_o คือ ปริมาตรคงที่ของห้อง Zeuch (m^3)

การสมการที่ใช้คำนวณค่าโมดูลัสการอัดตัวของเชื้อเพลิง หาอัตราการเปลี่ยนแปลงของความดันเทียบกับเวลาสมการที่ (2)

$$\frac{dP_x}{dt} = \frac{K_s}{V_o} \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

สามารถหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงได้จากสมการ (3)

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_o}{K_B} \frac{dP}{dt} \quad (3)$$

จากสมการความหนาแน่น (density equation) (White, 2009)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/m^3)

m คือ มวลของเชื้อเพลิง (kg)

V คือ ปริมาตรของเชื้อเพลิง (m^3)

นำสมการที่ (4) แทนในสมการที่ (3) เพื่อเปลี่ยนเป็นอัตราการไหลเชิงมวล

$$\frac{d\left(\frac{m}{\rho}\right)}{dt} = \frac{V_o}{K_B} \frac{dP}{dt} \quad (5)$$

สามารถหาอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงได้จากสมการที่ 6

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{V_o}{K_B} \frac{dP}{dt} \quad (6)$$

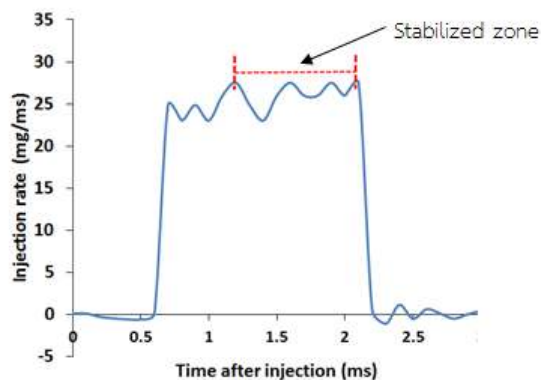
เมื่อ $\frac{dV}{dt}$ = อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s)

$\frac{dm}{dt}$ = อัตราการไหลเชิงมวล (mg/ms)

$\frac{dP}{dt}$ = ความดันที่เปลี่ยนแปลงของห้องจำลองในรูปของความดันที่เพิ่มขึ้นต่อเวลา (MPa/ms)

2. การกำหนดการวัดอัตราการฉีดของเชื้อเพลิง

การกำหนดช่วงการนับอัตราการฉีดเชื้อเพลิงจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Injection rate) และเวลา เนื่องจากการฉีดเชื้อเพลิงในช่วงเริ่มต้นในการฉีดเชื้อเพลิงมีผลจากการยกของเข็มหัวฉีดที่ไม่เต็มที่ ดังนั้นส่งผลให้การฉีดเชื้อเพลิงไม่คงที่ ในการทดลองนี้ได้เลือกช่วงคงที่ของอัตราการฉีดเฉลี่ยหลังจากการฉีดเชื้อเพลิงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการฉีด (Stabilized zone) ระบุส่วนที่เป็นเส้นสีแดงประตามภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การกำหนดการวัดอัตราการฉีดของเชื้อเพลิง



3. การคำนวณอัตราการฉีดของเชื้อเพลิงเฉลี่ย

จากการคำนวณเกี่ยวกับอัตราการฉีดของเชื้อเพลิงเฉลี่ย ($\dot{m}_{measured}$) นั้นสามารถคำนวณได้จากหัวข้อที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการฉีด (injection rate) กับเวลา (time) สามารถนำไปคำนวณเพื่อการประเมินการฉีดได้ดังนี้

3.1 เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number)

เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number) เป็นตัวแปรไร้มิติ ที่เป็นสัดส่วนของแรงขับในการเคลื่อนที่ของของไหลเทียบกับความต้านทานในการไหลของ โดยสมการนี้ได้ใช้ประเมินการไหลของของไหลภายในท่อ โดยที่ในทางวิจัยนี้ความเร็วเฉลี่ยทางออกของการฉีดของหัวฉีด ได้จากสมการที่ (7) หาเลขเรย์โนลด์สและ หาได้จากสมการที่ (8)

$$V_{mean} = \frac{\dot{m}_{measured}}{n_{orifice} \cdot S \cdot \rho} \quad (7)$$

$$Re = \frac{V_{mean} D_o}{\nu} \quad (8)$$

เมื่อ	V_{mean}	คือ ความเร็วทางออกของหัวฉีด (m/s)
	D_o	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด (mm)
	ν	คือ ความหนืดจลน (mm ² /s)
	$n_{orifice}$	คือ จำนวนรูของหัวฉีด
	S	คือ พื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด (m ²)

3.2 ค่าความร้อนจากการฉีดเชื้อเพลิง (Energy contents)

ค่าความร้อนสุทธิที่ส่งไปยังห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ หาได้จากอัตราการฉีดเชื้อเพลิงคูณด้วยกับค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง ดังสมการที่ 9

$$Energy\ contents = \dot{m}_{measured} \cdot LHV \quad (9)$$

โดยที่ LHV คือค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงจากการทดสอบ

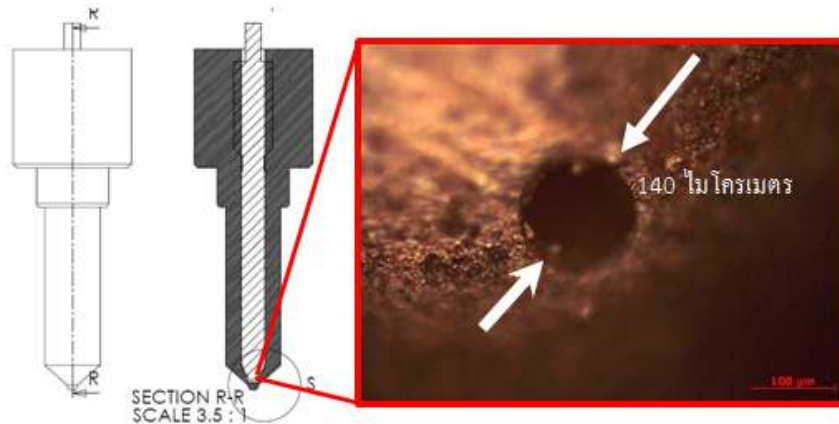
4. อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

4.1 ชุดทดลองหาปริมาณการฉีดเชื้อเพลิง

ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงดีเซลแบบคอมมอนเรลรุ่นยูกที่ 3 (HP3) ของรถปิกอัพ รุ่นไฮลักซ์ ผลิตโดยบริษัทโตโยต้ามอเตอร์ประเทศไทย จำกัด โดยระบบหัวฉีดถูกผลิตโดยบริษัทเดินโซ่จำกัด ทั้งนี้ได้เลือกความดันทดลองสูงสุดที่สามารถทำได้เท่ากับ 2,200 bar และหัวฉีดที่ใช้เป็นแบบโซลินอยด์ โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ดังนี้

4.1.1 หัวฉีด

หัวฉีดดีเซลที่ใช้เป็นแบบหัวเข็มและมีช่องในการฉีด (Sac) การที่สั่งการยกด้วยผลต่างความดันในห้องความคุมการยกของเข็มหัวฉีด (Command port) โดยหัวฉีดเป็นแบบช่องระหว่างเข็มหัวฉีดจำนวนช่องทางการฉีดเชื้อเพลิง ($n_{orifice}$) จำนวน 6 รู ซึ่งแต่ละรูของหัวฉีดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_o) 140 ไมโครเมตร แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง

4.1.2 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดลองนี้ได้ใช้น้ำมันปาล์มไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการทรานเอสเตอร์โดยเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติตามเปรียบเทียบกับดีเซลได้ดังตารางที่ 1 จากผลของความหนาแน่นของไบโอดีเซลมีค่ามากกว่าดีเซล 4.5% ความหนืดจลน์มีค่ามากกว่าดีเซล 25.2 % และค่าความร้อนของไบโอดีเซลมีค่าน้อยกว่า 11.6 % ผลของค่าทั้งหมดย่อมส่งผลทำให้คุณลักษณะหลักการทำงานของระบบหัวฉีดเชื้อเพลิงแบบคอมมอนเรลมีการเปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

คุณสมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ	ดีเซล (Diesel)	ปาล์มไบโอดีเซล (B100)
ความหนาแน่น (kg/m ³)	ASTM D4052	823	862
ความหนืดจลน์ @40 °C, (cSt)	ASTM D445	3.32	4.44
ค่าความร้อน (LHV), (MJ/kg)	ASTM D240	45.13	39.89

4.1.3 เงื่อนไขในการทดลอง

ตามตารางที่ 2 เลือกใช้หัวฉีดขนาด 6 รูเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 140 ไมโครเมตร ช่วงความดันในการฉีดเชื้อเพลิงสอดคล้องกับความดันในการฉีดเชื้อเพลิงของระบบคอมมอนเรลในเครื่องยนต์จริง ความดันในห้องเผาไหม้จำลองได้แก่ความดันในการจำลองเงื่อนไขการทำงานของหัวฉีดขณะทำการฉีดเชื้อเพลิง ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดช่วงเวลาที่หัวฉีดถูกกระแสไฟกระตุ้นให้เกิดการฉีดเชื้อเพลิง (Energizing duration) จากการฉีดเชื้อเพลิงช่วงกำลัง (Main injection) ของกลยุทธิ์ในการฉีดเชื้อเพลิงแบบคอมมอนเรล

ตารางที่ 2 เงื่อนไขในการทดลอง

คุณสมบัติ	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง
จำนวนรูและเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด	6 รู ขนาด 140 ไมโครเมตร
ความดันภายในห้อง Zeuch (Back pressure)	45 bar
ความดันในการฉีดเชื้อเพลิง (Injection pressure)	800, 1200 และ 1600 bar
ช่วงเวลาในการฉีด (Energizing duration)	0.5, 1, 1.5 และ 3 มิลลิวินาที



4.2 วิธีการทดลอง

ภาพชุดแผนผังการทดลองและอุปกรณ์การทดลองทั้งหมดแสดงแผนผังตามภาพที่ 6 โดยการทดลองถูกควบคุมให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงคงที่ตลอดการทดลอง ส่วนภาพที่ 7 เป็นภาพชุดทดลองจริงขณะทำการทดลอง การทดลองการวัดอัตราการฉีดขึ้นต้นตอนดังต่อไปนี้

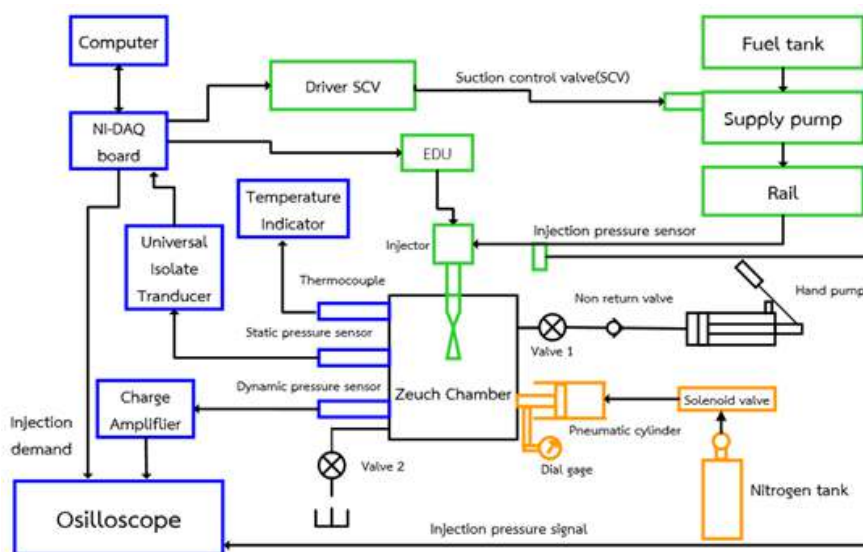
1. เริ่มจากการใช้ปั๊มมือ (Hand pump)อัดน้ำมันที่ใช้ในการทดลองเข้าสู่ห้องจำลองผ่านวาล์วโดยมีการควบคุมความดันในห้องจำลองเริ่มต้นให้เท่ากับ 45 bar

2. คอมพิวเตอร์เป็นตัวส่งควบคุมอุปกรณ์การทดลองซึ่งจะมีบอร์ด (NI-DAQ board) เป็นตัวสร้างสัญญาณความถี่ขนาด 250 Hz ตามความถี่ที่ใช้ควบคุมความดัน ของชุดหัวฉีดคอมมอนเรล (HP 3) จากนั้นความถี่ถูกแปลงสัญญาณไปยังวาล์วควบคุมปริมาณน้ำมัน (Suction control valve, SCV) ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมปริมาณของน้ำมันเข้าสู่ปั๊มน้ำมัน (Supply Pump) ซึ่งปั๊มน้ำมันจะทำหน้าที่จ่ายน้ำมันถูกควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบคอยล์เลอร์ ให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงก่อนจ่ายเข้าปั๊มมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสโดยมีค่าความผิดพลาด 2 องศาเซลเซียส ก่อนจ่าย เข้าไปยังรางคอมมอนเรล (Rail) ทำให้เกิดความดันสูง ซึ่งใช้ความดันในการฉีดเชื้อเพลิง (Injection pressure) 800, 1200 และ 1600 bar โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของความดันก่อนฉีดเชื้อเพลิง 10 ถึง 20 bar ก่อนที่สัญญาณไปยังตัวควบคุมสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ (EDU) ให้สั่งหัวฉีดทำงานตามเงื่อนไขการทดลอง

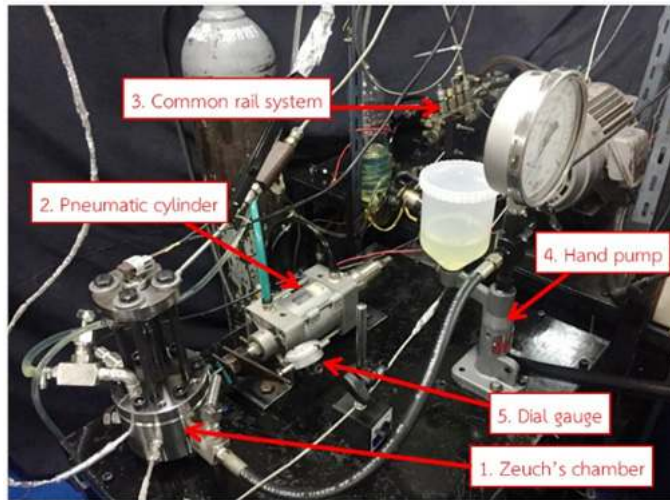
3. สั่งให้หัวฉีดทำงานตามช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิง (Energizing duration) โดยทำการฉีดน้ำมันเข้าไปในห้องจำลอง

4. หลังจากนั้นเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier) ส่งสัญญาณที่ได้เซนเซอร์วัดความดัน (Dynamic pressure sensor) ซึ่งเป็นผลต่างความดัน (dP) ที่ได้จากการฉีด ไปยังเครื่องรับสัญญาณ (Oscilloscope) อีกทั้งสัญญาณการฉีดที่ได้จากหัวฉีดได้ถูกส่งไปเครื่องรับสัญญาณด้วย จากนั้นบันทึกผล

5. นำผลการทดลองที่ได้ ซึ่งเป็นสัญญาณความดันที่ได้จากการฉีดไปคำนวณหาอัตราการฉีดเชื้อเพลิงตามสมการที่ (6) จากนั้นหาคุณลักษณะการฉีดและคำนวณเกี่ยวกับอัตราการฉีดเชื้อเพลิงเฉลี่ย



ภาพที่ 6 แผนผังการวัดปริมาณการฉีดเชื้อเพลิง

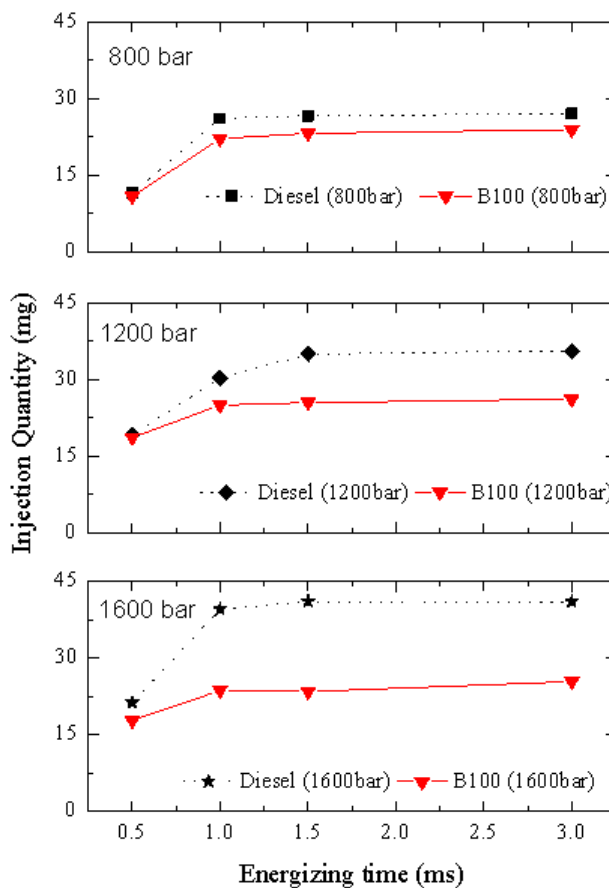


ภาพที่ 7 ชุดการวัดปริมาณการฉีดแบบ Zeuch พร้อมอุปกรณ์การทดลอง

ผลการทดลอง

1. อัตราการฉีดเชื้อเพลิง (Injection quantity)

อัตราการฉีดเชื้อเพลิงตามภาพที่ 8 พบว่า ผลของช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงมีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจากช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิง (Energizing time) เท่ากับ 1 มิลลิวินาทีอิทธิพลของความดันในการฉีดเชื้อเพลิงมีผลทำให้การฉีดเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของความดันฉีดเชื้อเพลิงที่ 1600 bar มีผลทำให้ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงที่โดย เฉพาะดีเซล ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงของปาล์มไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับความดันเท่ากันและช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงเท่ากัน พบว่ามีปริมาณในการฉีดเชื้อเพลิงที่น้อยกว่าดีเซลในทุกช่วงความดันในการฉีดเชื้อเพลิง ทั้งนี้การที่ความหนืดของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการต้านทานการฉีดของเชื้อเพลิงในกรณีไบโอดีเซลมีปริมาณการฉีดที่ลดลงทั้งนี้ผลการทดลองได้มีความขัดแย้งกับทฤษฎีการไหลแบบอัดตัวได้ (Incompressible flow) ตามสมการ $m^*_f = C_d A \sqrt{2p_f \Delta p}$ ในสมการนี้ค่า C_d ของการฉีดเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลมีค่าที่น้อยกว่า อันเนื่องมาจากทั้งนี้มาจากความหนืดของเชื้อเพลิงที่ต้านทานการไหล ส่วนเมื่อประกอบกับ ความหนาแน่นของไบโอดีเซลที่สูงขึ้นทำให้การยกเข็มหัวฉีดที่ห้องควบคุมการยกตัวของหัวฉีด (Control chamber) ให้มีการอัดตัวสูงตามความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นส่งผลระยะในการยก (Needle lift) มีระยะยกที่ลดลง สุดท้ายทำให้ปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงน้อยกว่า โดยผลการวิจัยสอดคล้องกับกรณีที่ใช้เป็นไบโอดีเซลและหัวฉีดคอมมอนเรล ตามงานวิจัยที่ผ่านมา (Moon et al, 2014)

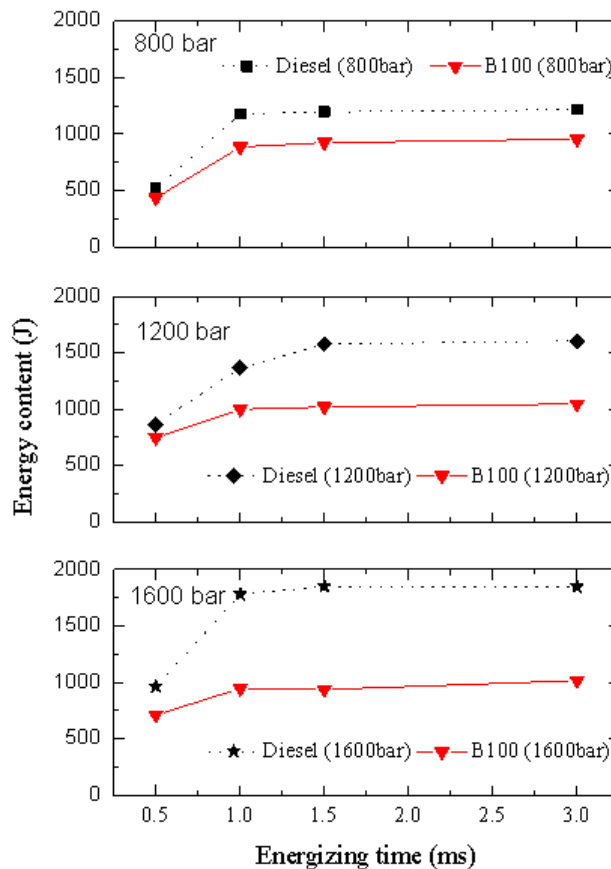


ภาพที่ 8 ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงที่ช่วงเวลาในการฉีดและความดันในการฉีดเชื้อเพลิงต่างกัน

2. ค่าพลังงาน (Energy contents)

ผลการคำนวณค่าพลังงานจากการฉีดเชื้อเพลิงจากสมการที่ 9 และนำเสนอผลการคำนวณตามภาพที่ 9 พบว่า อิทธิพลของความดันในการฉีดเชื้อเพลิงมีผลทำให้การฉีดเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ผลของช่วงเวลาในการฉีดที่เพิ่มขึ้นแต่อัตราการฉีดของเชื้อเพลิงมีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น

ค่าปริมาณในการฉีดเชื้อเพลิงของปาล์มไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับความดันเท่ากันและช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงเท่ากัน พบว่าพลังงานของไบโอดีเซลที่น้อยกว่ารวมกับอัตราการฉีดของไบโอดีเซลที่ลดลง ส่งผลให้ค่าพลังงานความร้อนในการฉีดเชื้อเพลิงที่น้อยกว่าดีเซลในทุกช่วงความดันในการฉีดเชื้อเพลิงทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของเชื้อเพลิงที่ฉีดออกมาและค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

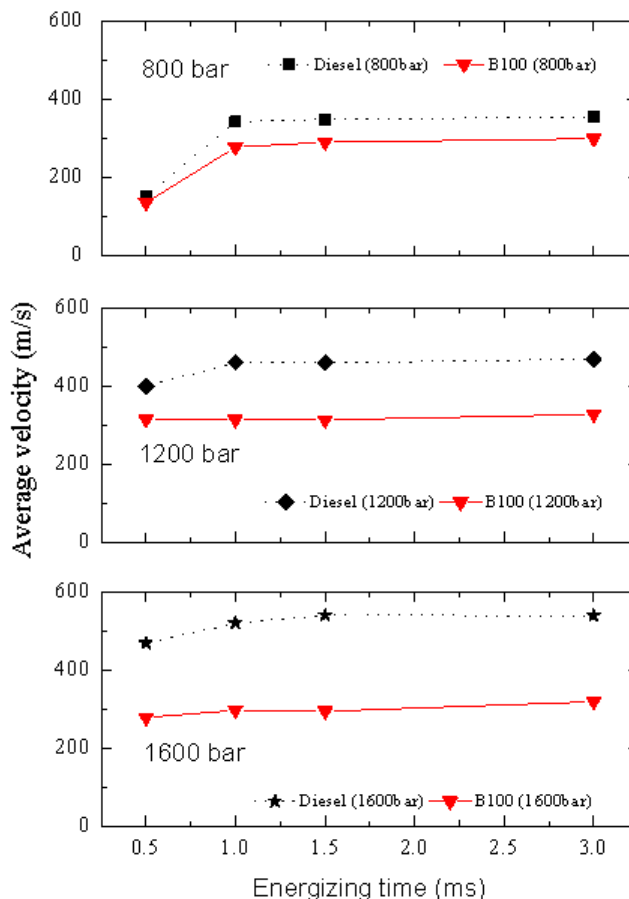


ภาพที่ 9 ค่าพลังงานการฉีดเชื้อเพลิงที่ช่วงเวลาในการฉีดและความดันในการฉีดเชื้อเพลิงต่างกัน

3. ความเร็วเฉลี่ยในการฉีดเชื้อเพลิง (Average velocity)

จากการคำนวณความเร็วเฉลี่ยในการฉีดเชื้อเพลิงในสมการที่ 7 พบว่าความเร็วในการฉีดเชื้อเพลิง การฉีดเชื้อเพลิงตามภาพที่ 10 พบว่าอิทธิพลของความดันในการฉีดเชื้อเพลิงมีผลทำให้ความเร็วในการฉีดเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ส่วนผลของช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงมีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ในส่วนช่วงเวลาการฉีดเชื้อเพลิงที่ 3 มิลลิวินาทีที่ทุกความดันในการฉีดเชื้อเพลิงนั้นค่าความเร็วเฉลี่ยการฉีดเชื้อเพลิงที่คงที่ทั้งนี้เกิดมาจากการลดลงของความดันในรางร่วม ถึงแม้การควบคุมความดันในการฉีดเชื้อเพลิงให้คงที่ตามงานวิจัยที่ผ่านมา (Srichai, Charoenphonphanich, Karin, Tongroon, & Chollacoop, 2016)

ปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงของปาล์มไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับที่ความดันเท่ากันและช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงเท่ากัน พบว่าการฉีดเชื้อเพลิงที่น้อยกว่าดีเซลในทุกช่วงความดันในการฉีดเชื้อเพลิง ทั้งนี้การที่ความหนืดจลน์ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการต้านทานการฉีดของเชื้อเพลิงและทำให้เกิดการสูญเสียความเร็วเฉลี่ยในการฉีดเชื้อเพลิง

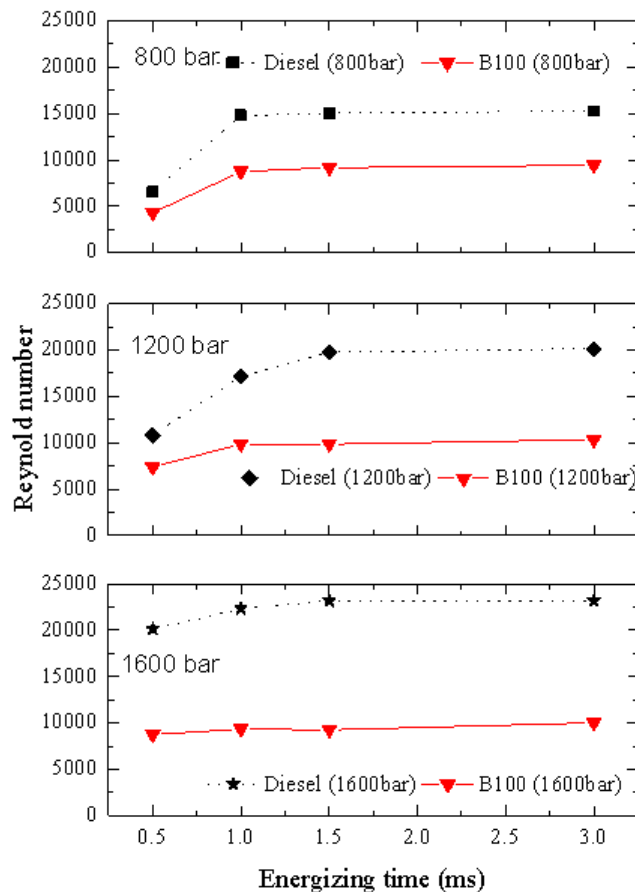


ภาพที่ 10 ค่าความเร็วเฉลี่ยการฉีดเชื้อเพลิงในช่วงเวลาในการฉีดและความดันในการฉีดเชื้อเพลิงต่างกัน

4. เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number)

จากการคำนวณเลขเรย์โนลด์สในการฉีดเชื้อเพลิงในสมการที่ 8 และแสดงผลตามภาพที่ 11 พบว่า อิทธิพลของความดันในการฉีดเชื้อเพลิงมีผลทำให้เลขเรย์โนลด์สที่เพิ่มขึ้น ทำให้เลขเรย์โนลในการฉีดเชื้อเพลิงมีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ในส่วนของความดันฉีดเชื้อเพลิงที่ 800 bar มีผลทำให้เลขเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้นตามความดันการฉีดเชื้อเพลิง การที่เพิ่มช่วงเวลาในการฉีดของเชื้อเพลิงที่มากกว่า 1 มิลลิวินาที ทำให้เลขเรย์โนลด์สลดลงทั้งนี้เกิดมาจากการไหลของเชื้อเพลิงที่ออกมาจากความช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงทำให้ความดันในรางคอมมอลเวลดลดลงจึงทำให้ผลต่างความดันชั้นการขับเชื้อเพลิงออกมาน้อยลงจนทำให้ความเร็วในการฉีดเชื้อเพลิงลดลงและส่งผลให้เลขเรย์โนลด์สลดลงตาม

เลขเรย์โนลด์สฉีดเชื้อเพลิงของปาล์มไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับที่ความดันเท่ากันและช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงเท่ากัน พบว่าการเลขเรย์โนลด์สของไบโอดีเซลมีค่าที่น้อยกว่าดีเซลในทุกช่วงความดันและช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิง และช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิง ทั้งนี้การที่ความหนืดของน้ำมันที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการต้านทานการฉีดของเชื้อเพลิง



ภาพที่ 11 เลขเรย์โนลด์ส์ของการฉีดเชื้อเพลิงที่ช่วงเวลาในการฉีดและความดันในการฉีดเชื้อเพลิงต่างกัน

สรุป

จากการทดลองผลของการฉีดเชื้อเพลิงด้วยระบบการทดสอบการฉีดเชื้อเพลิงแบบ Zeuch ของเชื้อเพลิงปาล์มไบโอดีเซลและดีเซล ที่เงื่อนไขการทดลองที่ช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงและความดันในการฉีดเชื้อเพลิงต่างกัน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1) ปริมาณการฉีดของเชื้อเพลิงของความดันในการฉีดเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นมีอิทธิพลต่อการฉีดเชื้อเพลิงที่มากขึ้นและช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงมีความสำคัญลดลงตาม
- 2) ค่าพลังงานความร้อนของการฉีดเชื้อเพลิงที่ใช้ปาล์มไบโอดีเซลมีค่าน้อยกว่าดีเซลในทุกช่วงความดันและช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการฉีดเชื้อเพลิงและค่าความร้อนของเชื้อเพลิง
- 3) ค่าความเร็วเฉลี่ยของการฉีดเชื้อเพลิงที่ใช้ปาล์มไบโอดีเซลมีค่าน้อยกว่าดีเซลในทุกช่วงความดันและช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิง เนื่องจากความหนืดของเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่า
- 4) เลขเรย์โนลด์ส์ของเชื้อเพลิงที่ความดันในการฉีดเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นมีอิทธิพลต่อการฉีดเชื้อเพลิงที่มากขึ้น ช่วงเวลาในการฉีดเชื้อเพลิงมีผลลดลงตาม ไบโอดีเซลมีความหนืดของเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นจึงเป็นการต้านทานการเคลื่อนที่และทำให้เลขเรย์โนลด์ส์ลดลง



ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. สามารถนำค่าช่วงเวลาการฉีดเชื้อเพลิงเพื่อไปกำหนดช่วงเวลาในการฉีดของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในระบบคอมมอนเรล
2. ควรรออกแบบปริมาตรภายในของรางฉีดเชื้อเพลิง (Fuel rail volume) ให้สามารถสะสมความและรักษาความดันในห้องหัวฉีดให้มีความเหมาะสมในขณะที่หัวฉีดเชื้อเพลิงให้ความความดันคงที่

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรทำติดตั้งเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดการยกตัวของเข็มหัวฉีดคอมมอนเรล เพื่อศึกษาพฤติกรรมการฉีดเชื้อเพลิงในเชิงลึกต่อไป
2. ควรทำการใช้เทคโนโลยีขดลวดภายในของหัวฉีดเพื่อลดสัณฐานผิวระหว่างผนังรูหัวฉีดและเชื้อเพลิงในที่มีความหนืดสูงกรณีใช้ไบโอดีเซล

รายการอ้างอิง (Reference)

- Automotive Engineering. (2018). *automotive engineering*. Retrieved 22 May 2018, from <http://th.wikipedia.org/wiki/automotiveengineering>.
- Benajes, J., Pastor, J. V., Payri, R., & Plazas, A. H. (2004). Analysis of the Influence of Diesel Nozzle Geometry in the Injection Rate Characteristic. *Journal of Fluids Engineering*, 126(1), 63.
- Boehman, A. L., Morris, D., Szybist, J., & Esen, E. (2004). The Impact of the Bulk Modulus of Diesel Fuels on Fuel Injection Timing. *Energy & Fuels*, 18(6), 1877-1882.
- Denso Australia (2018). *Common Rail System*. Retrieved 22 May 2018, form <http://www.denso.com.au/Products/Automotive/Engine-Management/Common-Rail-System>.
- Desantes, J. M., Payri, R., Salvador, F. J., & Gimeno, J. (2003). *Measurements of Spray Momentum for the Study of Cavitation in Diesel Injection Nozzles*. SAE Technical Paper 2003-01-0703.
- Dernotte, J., Hespel, C., Foucher, F., Houillé, S., & Mounaïm-Rousselle, C. (2012). Influence of physical fuel properties on the injection rate in a Diesel injector. *Fuel*, 96, 153-160.
- Han, D., Duan, Y., Wang, C., Lin, H., & Huang, Z. (2014). Experimental study on injection characteristics of fatty acid esters on a diesel engine common rail system. *Fuel*, 123, 19-25.
- Ishikawa, S., Ohmori, Y., Fukushima, S., Suzuki, T., Takamura, A., & Kamimoto, T. (2000). *Measurement of Rate of Multiple-Injection in CDI Diesel Engines*. SAE Technical Paper 2000-01-1257.
- Jung, D., Wang, W. L., Knafl, A., Jacobs, T. J., Hu, S. J., & Assanis, D. N. (2008). Experimental investigation of abrasive flow machining effects on injector nozzle geometries, engine performance, and emissions in a di diesel engine. *International Journal of Automotive Technology*, 9(1), 9-15.
- Knefel, T. (2011). The evaluation of the characteristic injection times of a multiple fuel dose. *Journal of KONES*, 18, 205-213.
- Lee, K. T., & Ofori-Boateng, C. (2013). Environmental Sustainability Assessment of Biofuel Production from Oil Palm Biomass. In K. T. Lee & C. Ofori-Boateng, *Sustainability of Biofuel Production from Oil Palm Biomass* (pp. 149-187). Singapore: Springer Singapore.



- Moon, S., Tsujimura, T., Gao, Y., Park, S., Wang, J., Kurimoto, N., & Oguma, M. (2014). Biodiesel effects on transient needle motion and near-exit flow characteristics of a high-pressure diesel injector. *International Journal of Engine Research*, 15(4), 504–518.
- Pandey, R. K., Rehman, A., & Sarviya, R. M. (2012). Impact of alternative fuel properties on fuel spray behavior and atomization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1762–1778.
- Payri, F., Bermúdez, V., Payri, R., & Salvador, F. J. (2004). The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles. *Fuel*, 83(4–5), 419–431.
- Payri, R., Garcia, J., Salvador, F., & Gimeno, J. (2005). Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics. *Fuel*, 84(5), 551–561.
- Salvador, F. J., Gimeno, J., De la Morena, J., & Carreres, M. (2012). Using one-dimensional modeling to analyze the influence of the use of biodiesels on the dynamic behavior of solenoid-operated injectors in common rail systems: Results of the simulations and discussion. *Energy Conversion and Management*, 54(1), 122–132.
- Seykens, X.L.J. Somers, L.M.T. & Baert, R.S.G. (2004). Modeling of commonrail fuel injection system and influence of fluid property on injection process. *Proceedings of the International Conference on Vehicles Alternative Fuel Systems & Environmental Protection, VAFSEP 2004*, 6-9 July 2004, Dublin, Ireland.
- Siano, D. (2010). *Fuel injection*. Sciyo, JanezaTrdine 9, Croatia.
- Som, S., Longman, D. E., Ramírez, A. I., & Aggarwal, S. K. (2010). A comparison of injector flow and spray characteristics of biodiesel with petrodiesel. *Fuel*, 89(12), 4014–4024.
- Srichai, P., Charoenphonphanich, C., Karin, P., Tongroon, M., & Chollacoop, N. (2016). *Injection Pressure Characteristics of Palm Methyl Ester and Diesel in Solenoid Injector under Common-Rail System*. SAE Technical Paper 2016-01-1729.
- Srichai, P., Ewphun, P.-P., Charoenphonphanich, C., Karin, P., Tongroon, M., & Chollacoop, N. (2018). Injection Characteristics of Palm Methyl Ester Blended with Diesel Using Zuech's Chamber. *International Journal of Automotive Technology*, 19(3), 535–545.
- Taşkıran, Ö. O., & Ergeneman, M. (2011). Experimental Study on Diesel Spray Characteristics and Autoignition Process. *Journal of Combustion*, 2011, 1–20.
- Thammnaomai, A. (2018). *Bureau of biofuel development*. Retrieved 22 May 2018, from https://www.mtec.or.th/files/Biofuel_PPT_diesohol.pdf.
- White, M. F. (2009). *Fluid Mechanics*. (7th ed.). USA: McGraw-Hill Companies, Inc.