



การกระจายของจำนวน-ขนาดของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลที่ถูกให้ความร้อนก่อน Number - Size Distribution of Particulate Matter from the Preheated Diesel Fuel Combustion

ภทรพล โพธิ์ม่วงพันธ์¹ และ สถาพร เชื้อเพ็ง^{2*}

¹ หลักสูตรปริญญาโท วิศวกรรมความปลอดภัยและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา 199 หมู่ 6 ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230
² กลุ่มวิจัยเทคโนโลยียานยนต์และพลังงานทางเลือก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา 199 หมู่ 6 ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230
*ติดต่อ: schuepeng@eng.src.ku.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 038354580, เบอร์โทรสาร 038354849

บทคัดย่อ

เครื่องยนต์ดีเซลในปัจจุบันที่ถูกใช้งานเป็นต้นกำลังในยานพาหนะบนถนนมีการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลก่อนป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อรักษาความสามารถในการไหลของเชื้อเพลิงและระดับการปลดปล่อยไอเสีย จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อหาลักษณะการกระจายจำนวน-ขนาดของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลที่มีการอุ่นเชื้อเพลิง ฝุ่นละอองแขวนลอยในไอเสียขนาดระดับนาโนเมตรถูกวัดด้วยตัวแยกขนาดฝุ่นละอองเคลื่อนที่แบบสแกนและตัวแยกขนาดฝุ่นละอองโดยใช้แสง นอกจากนี้ ยังมีการตรวจสอบคุณลักษณะของการเผาไหม้โดยการใช้ระบบวัดความดันกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลในสภาวะคงตัวภายใต้ภาระต่ำและปานกลาง (ความดันยังผลเฉลี่ยบังซี่ 4 และ 6 บาร์ ตามลำดับ) ที่ 1,500 รอบต่อนาที โดยใช้อุณหภูมิเชื้อเพลิง 35 50 และ 65 องศาเซลเซียส ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นการเร่งกระบวนการเผาไหม้โดยดูได้จากช่วงล่าช้าการจุดระเบิด และเพิ่มช่วงเวลาของการเผาไหม้ ฝุ่นละอองที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าเล็กกว่า 100 nm มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีจำนวนมากขึ้นเมื่ออุ่นเชื้อเพลิง ผลจากการทดลองเป็นข้อมูลสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์บำบัดไอเสียที่ต้องสัมผัสกับฝุ่นละอองอย่างต่อเนื่อง

คำหลัก: การเผาไหม้; ขนาด; ความเข้มข้น; ดีเซล; ฝุ่นละออง

Abstract

Diesel engines nowadays used as a prime mover for road vehicle preheat diesel fuel prior to feeding into the combustion chamber in order to maintain fuel flow ability and exhaust emission level. The objective of this research work is to determine the number-size distribution characteristics of particulate matter from the combustion of diesel fuel under preheating condition. The aerosol containing particulate matter in nanometer size is measured using a scanning mobility particle sizer and optical particle sizer. In addition, the combustion characteristics are also investigated using an engine indicating system in a diesel engine at steady-state low and medium loads (4 and 6 bar IMEP, respectively) at 1,500 rpm under fuel temperatures of 35, 50 and 65 °C. The experimental results have



been revealed that the increasing fuel temperatures accelerate the combustion process as indicated by ignition delay and lengthen the combustion duration. The particles with the equivalent diameter smaller than 100 nm shift toward the bigger size and greater number when preheating the fuel. The consequent results are information for the application with after-treatment device in continuously contacting with particulate matter.

Keywords: combustion; size; concentration; diesel; particulate matter

1. บทนำ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา ประเทศไทยมีการพัฒนาเศรษฐกิจโดยรวมและมีการเจริญเติบโตทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมเป็นอย่างมาก การผลิตในอุตสาหกรรม การก่อสร้าง การใช้สารเคมีทางการเกษตร การพัฒนาการจราจรและการขนส่ง เพื่อการประกอบการธุรกิจต่างๆ ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ

จากการตรวจสภาพอากาศของประเทศไทยโดยกรมควบคุมมลพิษ พบว่า มลพิษทางอากาศในประเทศไทยมีความรุนแรงมากขึ้นทุกปี [1] ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากฝุ่นละออง สารมลพิษอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณทางสัญจรของรถยนต์ เนื่องจากมีการเพิ่มการใช้รถยนต์มากขึ้น จึงทำให้เกิดฝุ่นละอองที่เกิดจากรถยนต์เพิ่มมากขึ้นไป ด้วย [2] ปัญหาหลักเป็นฝุ่นละอองจากท่อไอเสียได้แก่ ฝุ่นละออง ที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบหายใจส่วนล่าง ที่ทำให้เกิดการเจ็บป่วย ก๊าซและไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ซึ่งลักษณะของปัญหามลพิษทางอากาศต่อสุขภาพนั้นมีความแตกต่างกันไปตามพื้นที่ต่างๆในประเทศไทย รวมไปถึงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์

Chuepeng et al. (2009) [3] ศึกษาจำนวนอนุภาคขนาดนาโนเมตรจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลฉีดเชื้อเพลิงแบบร่าร่วมพร้อมกันกับการนำก๊าซไอเสียกลับมาใช้ใหม่ (Exhaust Gas Recirculation, EGR) ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นถึงการกระจายความเข้มข้น-ขนาดของอนุภาคฝุ่นละออง

ขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ การเผาไหม้ภายใต้การใช้งานร่วมกับ EGR ทำให้ความเข้มข้นของจำนวนอนุภาคลดลง

Di Iorio et al. (2016) [4] ศึกษาลักษณะของจำนวนอนุภาคและการกระจายขนาดของอนุภาคปลดปล่อยจากเครื่องยนต์ที่เดินเครื่องด้วยเชื้อเพลิงร่วมระหว่างก๊าซมีเทนและดีเซล จากการทดลองพบว่าอนุภาคขนาด 5.6 – 560 นาโนเมตร ได้รับผลกระทบจากการเผาไหม้ของดีเซลและก๊าซมีเทน การเผาไหม้ในโหมดเชื้อเพลิงร่วมก่อให้เกิดจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองและการกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียว

Chuepeng et al. (2011) [5] ศึกษาการกระจายขนาดของอนุภาคในก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เชื้อเพลิงผสมไบโอดีเซลในปริมาณที่มากถึง 30% (เรียก B30 ประกอบด้วยเชื้อเพลิงดีเซล 70% และไบโอดีเซลจากเมล็ดเรพ 30% โดยปริมาตร) กับเครื่องยนต์ดีเซลฉีดเชื้อเพลิงแบบร่าร่วมที่มีการควบคุมอุณหภูมิเชื้อเพลิง ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นของจำนวนของอนุภาคฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ B30 ที่มีมากกว่าแต่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าเล็กลงกว่าอนุภาคฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล

Yilmaz and Morton (2011) [6] ศึกษาผลกระทบของการอุ่นน้ำมันที่ได้จากพีซที่มีต่อสมรรถนะและการปลดปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล การอุ่นเชื้อเพลิงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิง การอุ่นน้ำมันที่ได้จากพีซเป็นการช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ แต่มีการปลดปล่อยก๊าซไนตริกออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล

Bari et al. (2002) [7] ศึกษาผลกระทบของการอุ่นน้ำมันปาล์มดิบที่มีต่อระบบสมรรถนะและการปล่อยปล่อยก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล โดยการใช้ความร้อนการอุ่นน้ำมันปาล์มดิบทำให้ความหนืดของน้ำมันปาล์มดิบลดลง เมื่อเปรียบเทียบการเผาไหม้ระหว่างน้ำมันปาล์มดิบและดีเซลพบว่า น้ำมันปาล์มดิบที่ถูกให้ความร้อนก่อนก่อให้เกิดความดันกระบอกสูบสูงสุดมากกว่า 6% มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนต่ำสุด และระยะเวลาเผาไหม้ที่ยาวนานขึ้น การเผาไหม้ของน้ำมันปาล์มดิบที่ถูกให้ความร้อนก่อนปล่อยก๊าซมลพิษคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไนตริกออกไซด์สูงกว่าน้ำมันดีเซล 9.2% และ 29.3% ตามลำดับ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังมีอีกหลายแง่มุมที่ยังไม่ได้ศึกษาวิจัย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาเชิงทดลองการให้ความร้อนเชื้อเพลิงดีเซลที่อุณหภูมิที่ต่างกันในช่วง 35 ถึง 65 °C ที่มีผลต่อการกระจายของจำนวน-ขนาดของฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ และตรวจสอบคุณลักษณะของการเผาไหม้โดยการใช้ระบบวัดความดันในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ โดยใช้เครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงแบบปั๊ม-ท่อ-หัวฉีด ได้ถูกทำการทดสอบในภาระต่ำและปานกลาง (4 และ 6 bar IMEP ตามลำดับ) ที่รอบเครื่องยนต์ 1,500 rpm

2. อุปกรณ์การทดลอง

2.1 เครื่องยนต์และเครื่องทดสอบสมรรถนะ

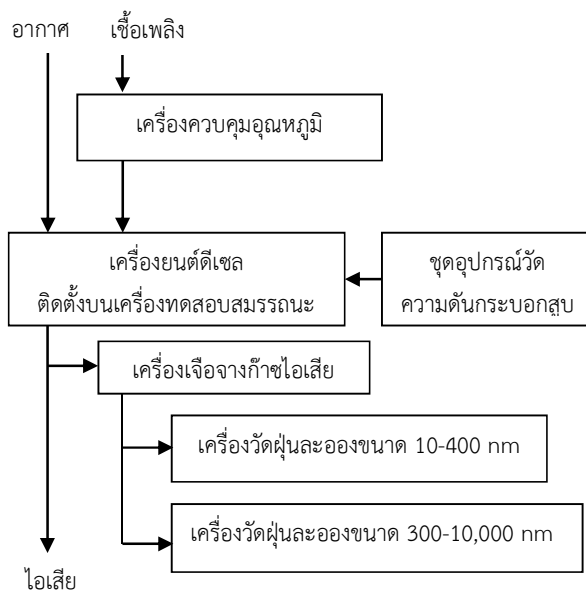
เครื่องยนต์ที่ใช้ในการศึกษาเชิงทดลองเป็นเครื่องยนต์ดีเซลยี่ห้อมิทซูบิชิ รุ่น 4D56 ที่มีข้อมูลจำเพาะที่สำคัญแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะจำเพาะของเครื่องยนต์ที่ใช้

แบบเครื่องยนต์	4 สูบ 4 จังหวะ
เส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกสูบ	91.1 mm
ระยะชัก	95.0 mm

ปริมาตรกระจัด	2,476 cm ³
แรงบิดสูงสุด	142 Nm ที่ 2,500 rpm
กำลังสูงสุด	55 kW ที่ 4,200 rpm
อัตราส่วนการอัด	21 : 1
ระบบระบายความร้อน	น้ำ

เครื่องยนต์ดีเซลดังกล่าวถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์แบบ Eddy Current ยี่ห้อ DYNomite™ รุ่น 012-200-1K ที่สามารถรองรับกำลังของเครื่องยนต์ได้ถึง 200 H.P. รูปที่ 1 แสดงแผนผังชุดอุปกรณ์การทดสอบหาคุณลักษณะของการเผาไหม้และการกระจายความเข้มข้นของจำนวน-ขนาดของอนุภาคฝุ่นละออง



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์ทดสอบเครื่องยนต์

2.2 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิง

อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่เครื่องยนต์ถูกวัดโดยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลยี่ห้อ Benetech รุ่น GM8901 ที่มีความถูกต้องอยู่ในช่วง $\pm 3\%$ of reading ในขณะที่อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันเชื้อเพลิงใช้เครื่องวัดยี่ห้อ



CST รุ่น CDR-3 สามารถวัดมวลน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความถูกต้องอยู่ในช่วง ± 0.05 g

อุณหภูมิของน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่เครื่องยนต์ถูกวัดโดยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิน้ำมันเชื้อเพลิงยี่ห้อ Lauda รุ่น E200 สามารถตั้งค่าอุณหภูมิได้ถึง 200 °C ความละเอียดในการปรับตั้ง 0.01 °C และมีค่าความถูกต้องในช่วง ± 0.2 °C

น้ำมันเชื้อเพลิงถูกดูดจากภาชนะกักเก็บที่วัดอัตราการไหลเชิงมวลตามที่อธิบายข้างต้นเข้าสู่ท่อระบบปิดผ่านไส้กรองดีเซลและผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จุ่มอยู่ในน้ำภายในอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิดังกล่าวก่อนเข้าสู่ด้านดูดของปั๊มเชื้อเพลิงดีเซลของเครื่องยนต์

2.3 เครื่องวัดความเข้มข้นของจำนวนและขนาดอนุภาคฝุ่นละออง

ความเข้มข้นของจำนวนและขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองในก๊าซไอเสียที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ถูกวัดโดย (1) ตัวแยกขนาดฝุ่นละอองเคลื่อนที่แบบสแกน (TSI รุ่น Nanoscan SMPS Nanoparticle Sizer 3910 ในงานนี้เรียก SMPS) มีช่วงการวัดขนาด $10 - 400$ nm และ (2) ตัวแยกขนาดฝุ่นละอองโดยใช้แสง (TSI รุ่น Optical Particle Sizer 3330 ในงานนี้เรียก OPS) มีช่วงการวัดขนาด $300 - 10,000$ nm

อนุภาคฝุ่นละอองในก๊าซไอเสียถูกสุ่มตัวอย่างออกมาประมาณ 100 cm จากท่อรวมไอเสียได้ถูกนำเข้าเครื่องเจือจางก๊าซไอเสียที่มีอัตราส่วนการเจือจาง 10 ต่อ 1 ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ 99.7 % เพื่อจำลองก๊าซไอเสียซึ่งถูกปล่อยสู่บรรยากาศและมีการเจือจาง ในการนี้ อุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ถูกเจือจางแล้วใกล้เคียงกับอุณหภูมิสถานะแวดล้อม ต่อมา ก๊าซไอเสียที่ถูกเจือจางได้ถูกนำเข้า SMPS และ OPS ด้วยอัตราการไหล 0.65 และ 0.95 lpm ตามลำดับ เพื่อทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของจำนวนและขนาดของฝุ่นละอองต่อไป สำหรับ

การนำเสนอเกี่ยวกับฝุ่นละอองในแต่ละสภาวะได้ทำการคำนวณปรับแก้อัตราส่วนการเจือจางแล้ว

2.4 ชุดอุปกรณ์วัดความดันกระบอกสูบ

ความดันกระบอกสูบที่สมนัยกับมุมเพลลาข้อเหวี่ยงได้ถูกใช้ในการตรวจสอบคุณลักษณะของการเผาไหม้ ความดันกระบอกสูบของสูบที่สองถูกวัดด้วย pressure transducer จาก Kistler รุ่น 6052C ที่มีความไว 19.90 pC/bar ที่ 200 °C และความเป็นเส้นตรง $\pm 0.4\%$ FSO สัญญาณที่ได้ถูกส่งไปยังเครื่องขยายและปรับแต่งสัญญาณจาก Dewetron รุ่น DEWE-30-4 มุมเพลลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ถูกวัดด้วย incremental shaft encoder จาก TR Electronic รุ่น IEV58-00003 ด้วยอัตรา 360 ppr สัญญาณทั้งหมดถูกส่งไปยังระบบเก็บข้อมูลของ Dewetron รุ่น DEWE-ORION-0816-100x ที่มีอัตราการสุ่มตัวอย่าง 1 MS/s และซอฟต์แวร์ DEWEsoft V.6.6.8 ใช้เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล ค่าความดันกระบอกสูบต่อเนื่องกัน 100 รัฐจักรถูกนำมาเป็นค่าเฉลี่ยทางสถิติและถูกนำมาใช้เพื่อแสดงคุณลักษณะของการเผาไหม้สำหรับการทดสอบแต่ละสภาวะ

2.5 เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นน้ำมันดีเซล (B5) ที่มีข้อมูลจำเพาะแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

คุณสมบัติ	ค่าจำเพาะ
ความหนาแน่นที่ 15 °C	825.5 kg/m ³
ความหนืดจลน์ ที่ 40 °C	2.9 cSt
กำมะถัน	0.0037 %wt
จุดวาบไฟ	60 °C
กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์	4.7 %vol.
อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	11 %wt

3. วิธีการทดลอง



3.1 สภาวะการทดลอง

การวิเคราะห์การกระจายความเข้มข้นของจำนวน-ขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลที่ขายในท้องตลาด ทำโดยศึกษาเชิงทดลองเครื่องยนต์ที่ติดตั้งอยู่บนแท่นทดสอบสมรรถนะ มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเชื้อเพลิงที่เข้าสู่เครื่องยนต์ถูกควบคุมให้คงที่ที่ 35, 50 และ 65 °C โดยควบคุมไม่ให้สูงเกินกว่าอุณหภูมิจุดระเบิดด้วยตัวเองของเชื้อเพลิง เครื่องยนต์ทำงานที่รอบคงที่ 1,500 rpm โดยใช้ภาระต่ำ (4 bar IMEP) และปานกลาง (6 bar IMEP) และมีการติดตั้งอุปกรณ์การวัดต่างๆ เพื่อเก็บข้อมูลการกระจายตัวของจำนวน ขนาดฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ที่ปลดปล่อยจากเครื่องยนต์เพื่อนำไปวิเคราะห์

3.2 การคำนวณตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

ความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (Indicated Mean Effective Pressure, IMEP) ใช้วัดสมรรถนะของเครื่องยนต์ในรูปของความดัน ในที่นี้ IMEP เป็นตัวบ่งชี้ถึงภาระของเครื่องยนต์ที่คำนวณได้จากกำลังบ่งชี้ (Indicated Power, P_i) ปริมาตรกระจัด (V_d) และรอบเครื่องยนต์ (N) ตามสมการ [8]

$$IMEP = \frac{2P_i}{V_d N} \quad (1)$$

อัตราการปลดปล่อยความร้อน (Heat Release Rate, $dQ_n/d\theta$) คำนวณได้จากข้อมูลความดันกระบอกสูบ (p) ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งเพลาค้อเหวี่ยง (θ) บนพื้นฐานของกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับสารทำงานที่เป็นก๊าซอุดมคติในระบบเปิด ตามสมการ [8]

$$\frac{dQ_n}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{d\theta} \quad (2)$$

เมื่อ γ คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ และ θ คือ มุมเพลาค้อเหวี่ยง

ช่วงล่าช้าการจุดระเบิด (Ignition Delay) ถูกนิยามว่าเป็นช่วงเวลาในหน่วยของมุมเพลาค้อเหวี่ยงตั้งแต่เริ่มฉีดเชื้อเพลิงไปจนถึงมุมที่อัตราการปลดปล่อยความร้อนเปลี่ยนเป็นค่าบวกที่เรียกว่าจุดเริ่มต้นของการเผาไหม้ สำหรับจุดเริ่มต้นของการเผาไหม้นั้นเกิดขึ้นเกิดขึ้นหลังจากเชื้อเพลิงดีเซลถูกฉีดและได้รับความร้อนจากบริเวณโดยรอบเพื่อระเหย (ค่าลบของอัตราการปลดปล่อยความร้อน) [8]

ช่วงเวลาการเผาไหม้ (Combustion Duration) ถูกนิยามว่าเป็นช่วงเวลาในหน่วยของมุมเพลาค้อเหวี่ยงตั้งแต่เริ่มเผาไหม้จนถึงสิ้นสุดการเผาไหม้ที่ซึ่งอัตราการปลดปล่อยความร้อนจะเปลี่ยนเป็นศูนย์ในจังหวะการขยายตัว [8]

ในการคำนวณเกี่ยวกับอนุภาคฝุ่นละออง มีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ (1) ความเข้มข้นของจำนวน (Number Concentration, n) ได้จากการวัดในแต่ละช่วงของเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าของอนุภาคฝุ่นละออง (D_p) และ (2) ความเข้มข้นของจำนวนรวม (Total Number Concentration, N) คำนวณจากสมการ

$$N = \sum_l^u n \quad (3)$$

เมื่อ l และ u คือ ขอบเขตล่างและบนของอันตรภาคชั้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่นละออง

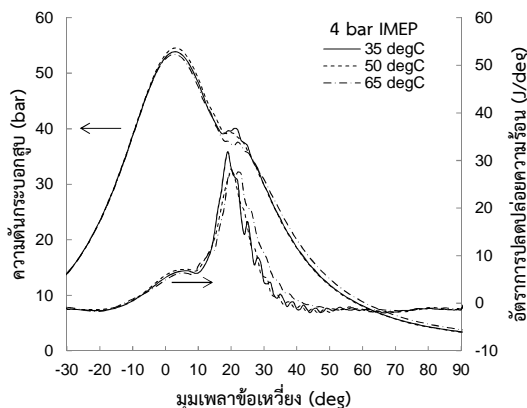
4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 คุณลักษณะของการเผาไหม้

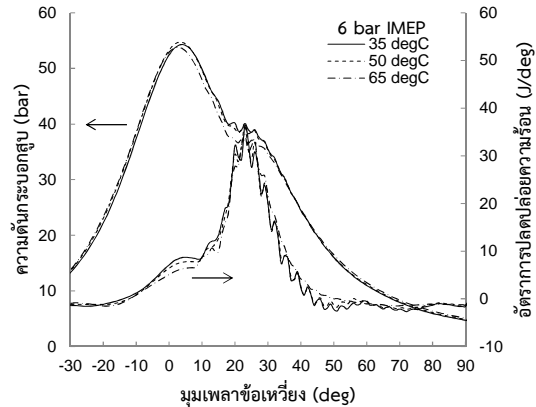
ความดันกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนในช่วงเวลาของการเผาไหม้ที่ปลายจังหวะอัดและต้นจังหวะขยายของเครื่องยนต์แสดงในรูปที่ 2 และ 3 ที่ 1,500 rpm ภาระ 4 และ 6 bar IMEP ตามลำดับ เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิเชื้อเพลิงเป็น 35, 50 และ 60 °C

ในรูปที่ 2 และ 3 ลักษณะของความดันกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนเมื่อภาวะและอุณหภูมิเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนไปเป็นไปในรูปแบบเดียวกัน สำหรับสถานะในการทดลองนี้ทำให้เกิดการเผาไหม้โดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นหลังศูนย์ตายบน โดยสังเกตได้จากอัตราการปลดปล่อยความร้อน

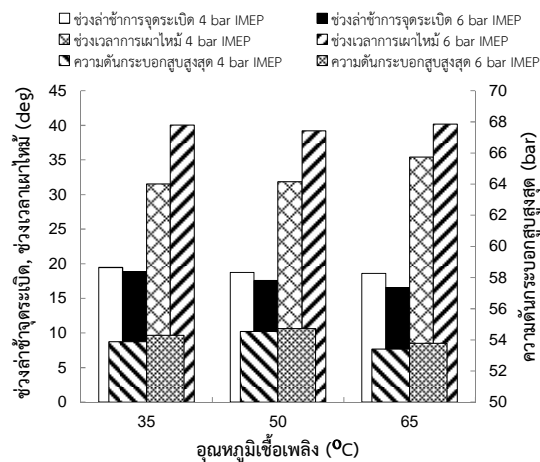
จากรูปที่ 2 และ 3 ความดันกระบอกสูบสูงสุดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักและไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเชื้อเพลิง ค่าของความดันกระบอกสูบสูงสุดอยู่ในช่วง 53.4-54.5 bar และ 53.8-54.7 bar สำหรับภาวะ 4 และ 6 bar IMEP ตามลำดับ (รูปที่ 4) อัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดมีค่าในช่วง 27.6 – 31.9 J/deg และ 34.5 – 36.6 J/deg สำหรับภาวะ 4 และ 6 bar IMEP ตามลำดับ นอกจากนี้ การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเกิดการแกว่งของอัตราการปลดปล่อยความร้อนในช่วงการเผาไหม้ที่มีเปลวไฟแบบแพร่ (Diffusion Combustion) และการเผาไหม้ช้าในช่วงสุดท้าย (Late Combustion) มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการปลดปล่อยความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ทั้งนี้การแกว่งของอัตราการปลดปล่อยความร้อนดังกล่าวเป็นผลโดยตรงมาจากความดันการเผาไหม้ โดยเชื้อเพลิงที่ร้อนกว่าก่อให้เกิดความดันการเผาไหม้ที่ราบเรียบกว่า



รูปที่ 2 ความดันกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่ภาวะ 4 bar IMEP, 1,500 rpm



รูปที่ 3 ความดันกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่ภาวะ 6 bar IMEP, 1,500 rpm



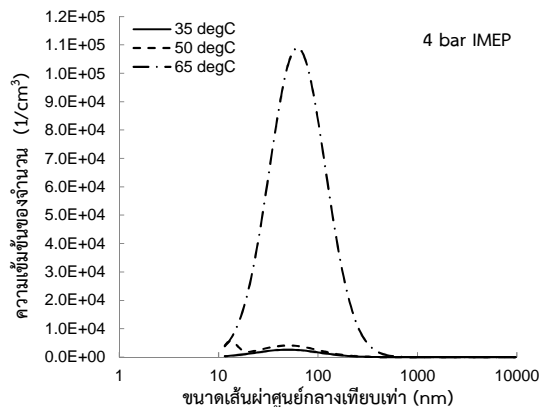
รูปที่ 4 ช่วงล่าช้าการจุดระเบิดและช่วงเวลาการเผาไหม้ ช่วงล่าช้าการจุดระเบิดและช่วงเวลาการเผาไหม้แสดงในรูปที่ 4 ที่ 1,500 rpm ภาวะเครื่องยนต์ 4 และ 6 bar IMEP เมื่ออุณหภูมิของเชื้อเพลิงดีเซล 35, 50 และ 60°C ในทุกสถานะการทดลอง การเพิ่มอุณหภูมิเชื้อเพลิงทำให้ช่วงล่าช้าการจุดระเบิดสั้นลง โดยช่วงล่าช้าการจุดระเบิดยาวกว่าที่ภาวะเครื่องยนต์น้อยกว่า และทำให้ช่วงเวลาการเผาไหม้ยาวนานขึ้น แต่ที่ภาวะเครื่องยนต์มากกว่ามีช่วงเวลาการเผาไหม้ยาวกว่า

ผลจากการทดลองมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จาก [7, 9] แต่มีการใช้เชื้อเพลิงที่เผาไหม้แตกต่างกัน การเพิ่มอุณหภูมิเชื้อเพลิงทำให้เชื้อเพลิงมีพลังงานและพร้อมที่จะจุดระเบิดได้ง่ายกว่าจึงทำให้ช่วงล่าช้าการจุดระเบิดสั้น

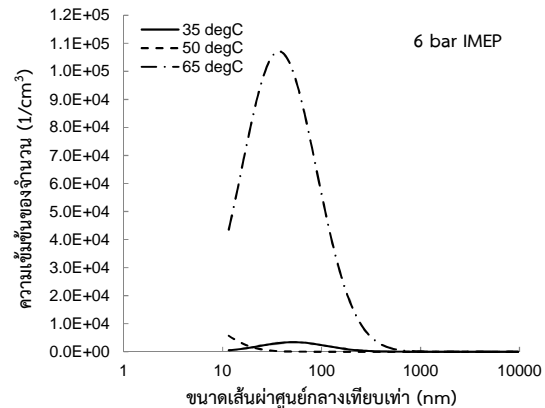
กว่า ในขณะที่เดียวกัน ที่ภาระเครื่องยนต์มากกว่าเกิดช่วง
ล่าช้าการจุดระเบิดสั้นกว่าเนื่องจากมีความร้อนสะสม
ภายในห้องเผาไหม้ที่มากกว่า [8]

4.2 การกระจายความเข้มข้นของจำนวน-ขนาดอนุภาค ฝุ่นละออง

รูปที่ 5 และ 6 แสดงการกระจายความเข้มข้นของ
จำนวน-ขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองจากเครื่องยนต์
ทำงานที่ภาระ 4 และ 6 bar IMEP 1,500 rpm
ตามลำดับ การกระจายความเข้มข้นของจำนวน-ขนาด
ของอนุภาคฝุ่นละอองมีค่าที่แตกต่างกันตามภาระของ
เครื่องยนต์ การเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องยนต์นี้ก่อให้เกิด
การกระจายความเข้มข้นของจำนวน-ขนาดของอนุภาค
ฝุ่นละอองเป็นแบบปกติ (log-normal distribution)
โดยมีความคล้ายคลึงกับข้อมูลใน [10-11]



รูปที่ 5 การกระจายความเข้มข้นของจำนวน-ขนาดของ
อนุภาคฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล
ที่ภาระ 4 bar IMEP, 1,500 rpm



รูปที่ 6 การกระจายความเข้มข้นของจำนวน-ขนาดของ
อนุภาคฝุ่นละอองจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซล
ที่ภาระ 6 bar IMEP, 1,500 rpm

จากรูปที่ 5 และ 6 การเพิ่มอุณหภูมิเชื้อเพลิงทำให้
การกระจายความเข้มข้นของจำนวนโดยส่วนใหญ่เพิ่ม
มากขึ้น ในขณะที่เดียวกัน ความเข้มข้นของจำนวนอนุภาค
ฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่กว่า 1,000 nm ได้ถูกตรวจพบ
เป็นจำนวนน้อยมาก (ใกล้ศูนย์) อย่างไรก็ตาม ขนาด
เส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าเฉลี่ยของอนุภาคฝุ่นละอองไม่
สามารถแจกแจงได้ชัดเจน จึงมีการอภิปรายในหัวข้อ
ต่อไป

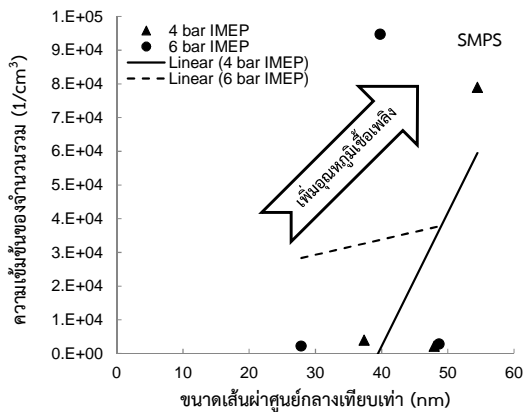
4.3 ความเข้มข้นของจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองรวม

รูปที่ 7 และ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความ
เข้มข้นของจำนวนรวมกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่า
ของอนุภาคฝุ่นละอองเมื่อใช้ตัวแยกขนาดฝุ่นละออง
เคลื่อนที่แบบสแกน (SMPS) และตัวแยกขนาดฝุ่นละออง
โดยใช้แสง (OPS) ตามลำดับ เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่
ภาระ 4 และ 6 bar IMEP 1,500 rpm

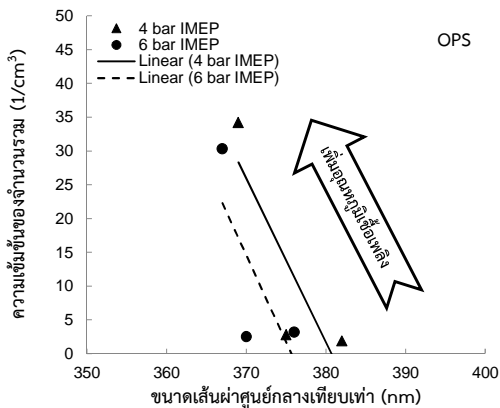
ในรูปที่ 7 ความเข้มข้นของจำนวนอนุภาคฝุ่น
ละอองรวมที่มีขนาดเทียบเท่าเล็กกว่า 100 nm ที่วัดได้
จาก SMPS นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีขนาด
เส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ
เชื้อเพลิง โดยสังเกตได้จากภาระเครื่องยนต์ทั้งสอง
ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการชนกัน (Collision) ของ

อนุภาคที่มีความเข้มข้นของจำนวนมากซึ่งเกิดการชนแล้วรวมกัน (Coalescent) ทำให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าใหญ่ขึ้น แต่ยังคงมีความเข้มข้นของจำนวนอนุภาคมากอยู่ [5] สำหรับเครื่องยนต์ทำงานในสภาวะที่รับภาระน้อยกว่า ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าอยู่ในช่วงที่ใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์รับภาระมากกว่า (37-55 nm และ 28-49 nm สำหรับ 4 และ 6 bar IMEP ตามลำดับ)

เส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าเล็กลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเชื้อเพลิง ซึ่งสังเกตได้จากภาวะเครื่องยนต์ทั้งสอง สำหรับเครื่องยนต์ทำงานในสภาวะที่รับภาระน้อยกว่า (4 bar IMEP) ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าอยู่ในช่วงที่ใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์รับภาระมากกว่า (6 bar IMEP) (369 ถึง 382 nm สำหรับ 4 bar IMEP เทียบกับ 367 ถึง 376 nm สำหรับ 6 bar IMEP)



รูปที่ 7 ความเข้มข้นของจำนวนรวมที่วัดได้จาก SMPS



รูปที่ 8 ความเข้มข้นของจำนวนรวมที่วัดได้จาก OPS

ในรูปที่ 8 ความเข้มข้นของจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองรวมที่มีขนาดเทียบเท่าในช่วง 300 ถึง 10,000 nm ที่วัดได้จาก OPS นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่มีขนาด

5. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาการกระจายของจำนวน-ขนาดของฝุ่นละอองที่เป็นผลมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลที่ถูกให้ความร้อนก่อน เครื่องยนต์ทำงานที่ 1,500 rpm ภาระ 4 และ 6 bar IMEP อุณหภูมิเชื้อเพลิงเข้าเครื่องยนต์ถูกควบคุมให้คงที่ที่ 35, 50 และ 65 °C โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

- อัตราการปลดปล่อยความร้อนที่สัมพันธ์กับความดันกระบอกสูบ มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันเมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลที่ถูกให้ความร้อนก่อน ความดันกระบอกสูบสูงสุดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ช่วงล่าช้าการจุดระเบิดสั้นลง และช่วงเวลาการเผาไหม้ยาวนานขึ้น

- การเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลที่ถูกให้ความร้อนก่อน ทำให้การกระจายความเข้มข้นของจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองโดยส่วนใหญ่เพิ่มมากขึ้น ความเข้มข้นของจำนวนอนุภาคฝุ่นละอองรวมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าเล็กกว่า 100 nm มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าใหญ่ขึ้น สำหรับเครื่องยนต์ทำงานในสภาวะที่รับภาระน้อยกว่า ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์รับภาระมากกว่า

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา (สัญญาเลขที่ 4/2557) ขอขอบคุณบริษัท ไทยออยล์ จำกัด



(มหาชน) สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนนำเสนองานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ (2560). *สถิติการตรวจสอบสภาพอากาศของประเทศไทย, [ระบบออนไลน์]*, แหล่งที่มา <http://www.aqmthai.com>, เข้าดูเมื่อวันที่ 10/01/2017.
- [2] Leong, S.T., Muttamara, S., and Laortanakul, P. (2002). Influence of benzene emission from motorcycle on Bangkok air quality, *Atmospheric Environment*, vol. 36, pp. 3495 – 3503.
- [3] Chuepeng, S., Xu, H.M., Tsolakis, A., Wyszynski, M.L., and Hartland, J. (2009). Nanoparticle number from biodiesel blends combustion in a common rail fuel injection system diesel engine equipped with exhaust gas recirculation, *Combustion Engines*, vol. 138(3), pp. 28 – 36.
- [4] Di Iorio, S., Magno, A., Mancaruso, E., and Vaglieco, B.M. (2016). Characterization of particle number and mass size distributions from a small compression ignition engine operating in diesel/methane dual fuel mode, *Fuel*, vol. 180, pp. 613 – 623.
- [5] Chuepeng, S., Xu, H.M., Tsolakis, A., Wyszynski, M.L., and Price, P. (2011). Particulate matter size distribution in the exhaust gas of a modern diesel engine fuelled with a biodiesel blend, *biomass and bioenergy*, vol. 35, pp. 4280 – 4289.
- [6] Yilmaz, N. and Morton, B. (2011). Effects of preheating vegetable oils on performance and emission characteristics of two diesel engines, *biomass and bioenergy*, vol. 35, pp. 2028 – 2033.
- [7] Bari, S., Lim, T. and Yu, C. (2002). Effects of preheating of crude palm oil (CPO) on injection system, performance and emission of a diesel engine, *Renewable Energy*, vol. 27, pp. 339 – 351.
- [8] Heywood, J.B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, Singapore.
- [9] Pradhan, P., Raheman, H., and Padhee, D. (2014). Combustion and performance of a diesel engine with preheated *Jatropha curcas* oil using waste heat from exhaust gas, *Fuel*, vol. 115, pp. 527 – 533.
- [10] Ajtai, T., Pintér, M., Utry, N., Kiss-Albert, G., Gulyás, G., Pusztai, P., Puskás, R., Bereczky, Á., Szabados, Gy., Szabó, G., Kónya, Z., and Bozóki, Z. (2016). Characterisation of diesel particulate emission from engines using commercial diesel and biofuels, *Atmospheric Environment*, vol. 134, pp. 109 – 120.
- [11] Chuepeng, S., Theinnoi, K., Tsolakis, A., Xu, H.M., Wyszynski, M.L., York, A.P.E., Hartland, J.C., and Qiao, J. (2008). Investigation into particulate size distributions in the exhaust gas of diesel engines fuelled with biodiesel blends, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 15(3), pp. 75 – 82.