

การจำลองคุณลักษณะเบื้องต้นของลำพุ่งเชื้อเพลิงความเร็วสูง Simulation on fundamental characteristic of high speed fuel jet

วิระพันธ์ สีหานาม^{1*}, วุฒิชัย สิทธิวงษ์¹, กุลเชษฐ์ เพียรทอง¹ และ อนิรุตต์ มัทธจักร¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

โทร 0-4535-3381 โทรสาร 0-4535-3380 *อีเมลล์: wirapan_seehanam@yahoo.com

Wirapan Seehanam^{1*}, Wuttichai Sittiwong¹, Kulachate Pianthong¹, and Anirut Matthujak¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchatany University, Ubon Ratchatani, 34190,

Thailand. Tel: 0-4535-3381, Fax: 0-4535-3380 *E-mail: wirapan_seehanam@yahoo.com

บทคัดย่อ

การฉีดเชื้อเพลิงด้วยความเร็วสูงมากๆช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้และลดมลภาวะที่เป็นพิษจากเครื่องยนต์ โดยเฉพาะกับเครื่องยนต์ดีเซล แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาในประเด็นดังกล่าวยังมีน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับกรณีการฉีดเชื้อเพลิงในระดับจิกะพาสคาล และความเร็วมวลสูงที่สุดเกิดระดับความเร็วเสียงมากๆ ด้วยเหตุนี้การวิจัยนี้จึงได้พยายาม ศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของลำพุ่งเชื้อเพลิงความเร็วสูง โดยใช้ การคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) จำลองการฉีดพ่นของน้ำมันก๊าดโดยในแบบจำลองประกอบด้วยของไหล 2 ชนิด คือ น้ำมันก๊าด และอากาศ ความเร็วเริ่มแรกของเชื้อเพลิงอยู่ที่ 1300 เมตรต่อวินาที พุ่งออกสู่อากาศที่อยู่หนึ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ผลการศึกษาจาก CFD และการทดลองให้ผลใกล้เคียงกัน การศึกษานี้สนใจพิจารณาระยะแหวกอากาศและความเร็วของลำพุ่ง ผลการศึกษาทำให้เราเข้าใจคุณลักษณะของลำพุ่งเชื้อเพลิงความเร็วสูงได้ดียิ่งขึ้นและข้อมูลที่ได้อาจเป็นรากฐานสำหรับการพัฒนาในระดับต่อไป

Abstract

Injection of fuel jet at ultra-high pressure can benefit the combustion efficiency and emission reduction in internal combustion engine especially the diesel engine. However, very few studies had been carried out in the past, especially when injection pressure is in the order of GPa (10,000 bar) and the jet velocities are in hypersonic and supersonic ranges. In this study, fundamental characteristics of high speed fuel jets are calculated and visualized by Computational Fluid Dynamic (CFD). Computational domain, consisted of liquid fuel and air, is

modeled on the basis of two phase flow. The liquid jet is injected at velocity of around 1300 m/s, while the air is quiescent. The CFD results show quite similar trend to the previous experimental results. The simulation is time dependent or unsteady. The fundamental characteristics which are penetration distance and velocity attenuation of fuel jet are the main focus. From this study, more understanding on the characteristics of high speed fuel jet can be obtained and will be useful further development.

1. บทนำ

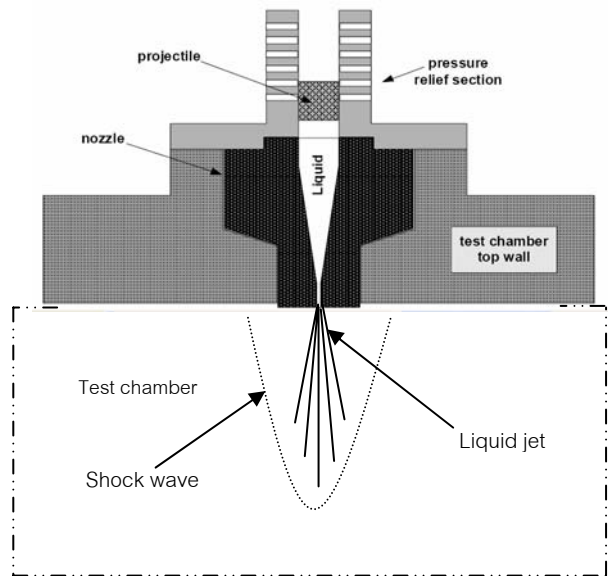
การฉีดน้ำมันในเครื่องยนต์ดีเซลด้วยความดันสูงมากๆสามารถทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพดีขึ้นและช่วยลดมลภาวะจากการเผาไหม้ได้ ทั้งนี้การฉีดเชื้อเพลิงให้มีความเร็วสูงจะทำให้เพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลสูงขึ้น [1,2] ซึ่งเครื่องยนต์ในปัจจุบันที่ฉีดเชื้อเพลิงแบบเป็นจังหวะเปิด-ปิด (intermittent) นั้น สามารถฉีดเชื้อเพลิงได้ระดับความดันในช่วง 75-230 MPa ความเร็วสูงสุดของลำพุ่งอยู่ที่ประมาณ 255-520 m/s ถ้าในสภาวะความดันบรรยากาศ ความเร็วในระดับนี้จะอยู่ในช่วงที่สูงกว่าความเร็วเสียง (transonic หรือ supersonic) แต่ในกระบอกสูบที่มีความดันและอุณหภูมิสูงกว่าสภาวะบรรยากาศทั่วไป ทำให้ความเร็วระดับดังกล่าวอยู่ต่ำกว่าความเร็วเสียงที่สภาวะกระบอกสูบ (ความเร็วเสียงในกระบอกสูบประมาณ 550 m/s) [3] ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายกลุ่มพยายามศึกษารณีการฉีดเชื้อเพลิงด้วยความเร็วสูงระดับความเร็วสูงกว่าเสียงมาก (ระดับ supersonic หรือ hypersonic) [4,5] คุณลักษณะการฉีดถูกทดสอบและศึกษาเป็นระดับแรกๆ เพราะว่าเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาการฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลแบบ homogeneous charge compression-ignition (HCCI) เพื่อให้ได้อัตราส่วนของอากาศ-เชื้อเพลิง ที่เหมาะสมอันประโยชน์ต่อการลดอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและมลภาวะจากการเผาไหม้

อุปสรรคในการทดลองเพื่อศึกษาการฉีดเชื้อเพลิงด้วยความเร็วสูง คือ การวัดที่ทำได้ยากในทางปฏิบัติและจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ราคาแพง ด้วยเหตุนี้ การคำนวณพลศาสตร์การไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) จึงเป็นเครื่องมือทางเลือกใหม่เพื่อใช้ศึกษาและวิเคราะห์ลำพุงของเชื้อเพลิงในลักษณะต่างๆ ซึ่ง Zakrzewski *et al.* [6] ใช้ CFD โปรแกรม FLUENT ศึกษาคุณลักษณะของลำพุงที่ได้รับอิทธิพลจาก shock เมื่อลำพุงเคลื่อนที่ผ่านอากาศ โดยได้เพิ่มโปรแกรม (User Define Function, UDF) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการคำนวณใน CFD ให้เพิ่มขึ้น โดยการศึกษาตั้งจำลองการแบ่งสถานะระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงแบบปฏิกิริยาเคมีของ multi-species ที่อัตราส่วนความหนาแน่นแตกต่างกันมากๆ นอกจากการศึกษาของ Zakrzewski *et al.* แล้ว Pianthong *et al.* [7] ได้นำ CFD โปรแกรม Auto Dyn ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับการจำลองการเกิด shock ในวัสดุหรือของไหล ศึกษาควบคู่กับการทดลอง โดยเปลี่ยนแปลงชนิดของของไหล ซึ่งพบว่าชนิดของเชื้อเพลิงมีผลกับพฤติกรรมของลำพุงน้อยเมื่อความดันสำหรับฉีดและความเร็วของลำพุงมีค่าสูง แต่อย่างไรก็ตามทั้งสองงานวิจัยยังเป็นการคาดคะเนพฤติกรรมของลำพุงในเบื้องต้นอยู่ ยังไม่ได้ศึกษาคุณลักษณะทางพลศาสตร์ (dynamics characteristics) ของลำพุง เช่น ระยะแหวกอากาศ (penetration distance) และความเร็วเฉลี่ยของลำพุง (average jet velocity) อีกทั้ง ยังมีหลายตัวแปรที่ยังไม่มีการศึกษาและพิจารณา เช่น การเป็นละอองของเชื้อเพลิง (atomization) การกระจายตัวของเม็ดเชื้อเพลิงเหลว (droplet breakup) และ อากาศพลศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงเหลว ทั้งนี้มีสาเหตุหลักเนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในเวลานั้นยังมีประสิทธิภาพด้อยอยู่ ทำให้เกิดปัญหา การลู่ออกของผลเฉลยและได้คำตอบของปัญหาไม่ถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามโปรแกรม CFD ก็ถูกพัฒนาและศึกษาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ CFD ในปัจจุบันสามารถคำนวณปัญหาได้ครอบคลุมปัญหาได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น รวมทั้งกรณีปัญหาการไหลของลำพุงความเร็วสูงผ่านอากาศ ก็เช่นเดียวกัน ดังนั้น การศึกษานี้จึงได้นำเอา CFD โปรแกรม FLUENT เวอร์ชันใหม่ มาใช้ศึกษาปัญหาการฉีดเชื้อเพลิงความเร็วสูง โดยจำลองการฉีดของน้ำมันก๊าด (kerosene) สู่อากาศที่อยู่หนึ่ง ซึ่งจะศึกษาและพิจารณา คุณลักษณะทางพลศาสตร์ โดยเปลี่ยนแปลงตามเวลาในช่วง 350 usec ที่ความเร็วลำพุงสูงสุด 1300 m/s

2. วิธีการสร้างลำพุงความเร็วสูงและระบบถ่ายภาพ

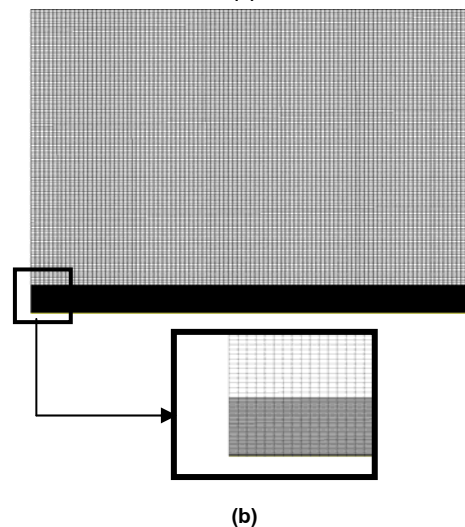
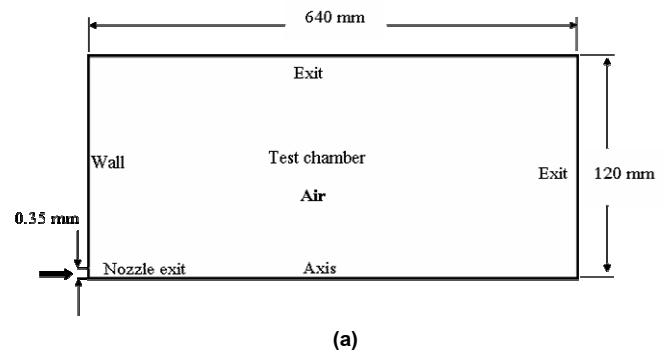
ในการทดลอง ใช้วิธีของ Bowden-Brunton [8] เพื่อสร้างลำพุงที่มีความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 1 โดยหลักการนี้จะบรรจุเชื้อเพลิงเหลวในหัวฉีด จากนั้นปล่อยลูกปืนด้วยความเร็วสูงกระแทกทำให้ภายในหัวฉีดเกิดความดันสูงระดับ GPa และปล่อยเชื้อเพลิงด้วยความเร็วสูงสุดเหนือเสียงที่ความดันบรรยากาศ ออกสู่ห้องทดสอบ ซึ่งกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (high speed video camera) ที่สามารถถ่ายภาพได้ 10^6 เฟรมต่อวินาที ถ่ายได้ 103 เฟรม จะบันทึกภาพด้วยเทคนิคการมองภาพแบบซาโดกราฟ (shadowgraph optical system) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้เราสามารถมองเห็น shock wave ที่เกิดในอากาศได้ ทั้งนี้เพื่อใช้อธิบายคุณลักษณะเชิงพลศาสตร์ของลำพุงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ต่างๆ ซึ่งรายละเอียดของชุดทดลองสามารถดูได้จากการศึกษาของ Pianthong's *et al.* [7] และข้อมูลการทดลองของน้ำมันก๊าดเพื่อใช้เปรียบเทียบในการศึกษานี้ ได้จากการศึกษาที่ผ่านมาของ Matthujuk, *et al.* [9]



รูปที่ 1 กระบวนการสร้างลำพุงความเร็วสูง

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ CFD



รูปที่ 2 (a) รูปร่าง และ (b) ขอบเขตปัญหาของห้องทดสอบ

กรอบและขอบเขตของปัญหาการฉีดเชื้อเพลิงด้วยความเร็วสูงที่เกิดขึ้นในห้องทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 2(a) โดยที่ทางออกของหัวฉีด (nozzle exit) มีเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 7 mm และขนาดห้องทดสอบกว้าง 24 ซม. และ ยาว 640 ซม. ซึ่งรูปที่ 2 แสดงในมุมมองแบบสมมาตรในแนวแกน จากกรอบปัญหาและขอบเขตดังกล่าว สามารถสร้างรูปร่างแบบจำลองและกริดด้วยโปรแกรม GAMBIT โดยรูปร่างกำหนดเป็นแบบสมมาตรในแนวแกน (axis-symmetry) และสร้างกริดสี่เหลี่ยม quadrilateral จำนวนประมาณ 100,000 โหนด ให้นำหน้าบนบริเวณที่คาดว่ามีการผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศจะเกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2(b) รูปร่างแบบจำลองที่ได้นี้จะนำไปคำนวณด้วยโปรแกรม FLUENT เพื่อทดสอบและศึกษาคุณลักษณะเชิงพลศาสตร์ของลำพุ่งความเร็วสูง โดยการศึกษาจะใช้น้ำมันก๊าดเป็นเชื้อเพลิงเหลว ทั้งนี้ในการคำนวณกำหนดคุณสมบัติให้เป็นของเหลวที่มีความหนาแน่นคงที่ ขณะที่อากาศกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นก๊าซอุดมคติ (ideal gas) ที่สามารถกดอัดได้ กำหนดคุณสมบัติของผสมจากสารทั้งสองด้วยแบบจำลองของ Volume of Fluid (VOF) การคำนวณเป็นแบบเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลา โดยขนาดช่วงเวลาคำนวณ 1 μ s และทำการเก็บข้อมูลทุกๆช่วงเวลาที่ยาวพอสมควร การจำลองความปั่นป่วนของการไหลใช้แบบจำลองแบบ realizable k- ϵ ระเบียบคำนวณปัญหาแบบ segregate solver ความเร็วของเชื้อเพลิงที่ทางเข้า (nozzle exit) 1300 m/s

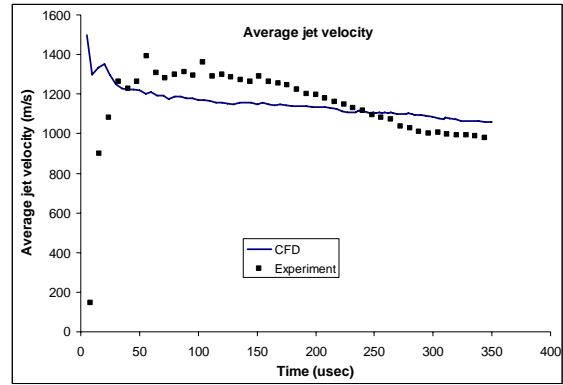
4. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

4.1 คุณลักษณะเชิงพลศาสตร์ของลำพุ่งจากน้ำมันก๊าด

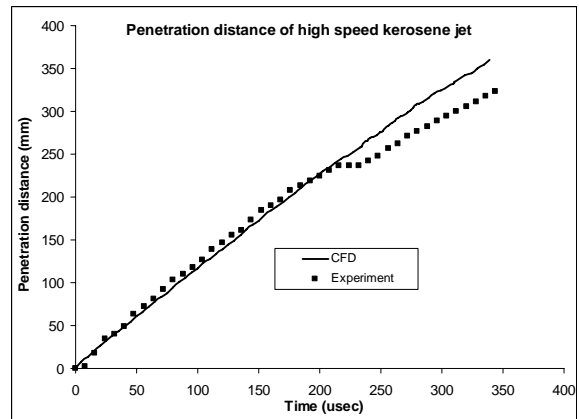
กราฟความเร็วเฉลี่ย ระยะแหวกอากาศ และความเร็วช่วง ณ ช่วงเวลา ต่อเวลาที่ลำพุ่งของน้ำมันก๊าดเคลื่อนที่ไป แสดงในรูปที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ ที่ช่วงเวลาเริ่มต้น (0 -75 μ s) ผลการคำนวณความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ผลจากการทดลองความเร็วจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลที่แตกต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างของกระบวนการการสร้างลำพุ่งใน CFD และการทดลอง ในแบบจำลองลำพุ่งถูกกำหนดให้เคลื่อนที่เข้าสู่ขอบเขตปัญหาด้วยความเร็วเริ่มต้นสูงสุด (1300 m/s) แต่ในการทดลองลำพุ่งจะถูกฉีดออกมาด้วยการอัดของลูกปืนทำให้ความเร็วของลำพุ่งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงความเร็วสูงสุด หลังจากลำพุ่งมีความเร็วสูงสุด ความเร็วเฉลี่ยและความเร็วช่วง ณ ช่วงเวลา จะลดลงอย่างรวดเร็ว

โดยทั่วไปแล้ว ผลจากการทดลองพบว่าลำพุ่งจะอ่อนกำลังและอัตราการแหวกอากาศลดลงหลังจากลำพุ่งเคลื่อนที่ไปได้ 200 μ s เนื่องจากการแยกตัวของหยดของเหลวออกจากลำพุ่ง ประกอบกับการเกิดละอองของเชื้อเพลิงจากการเคลื่อนที่สัมผัสกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ นอกจากนี้แล้ว แรงต้านจากอากาศก็เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ลำพุ่งมีความเร็วลดลงเช่นกัน แต่การคำนวณใน CFD เรากำหนดให้น้ำมันก๊าดความเร็วที่ทางเข้าของขอบเขตมีสูงสุดคงที่ และต่อเนื่อง อีกทั้งไม่ได้พิจารณาการเกิดหยดของเหลวและละอองของเชื้อเพลิงทำให้ระยะการแหวกอากาศของลำพุ่งมีค่าคงที่ จากรูปที่ 5 พบว่าผลจากการทดลอง และ CFD มีค่าความเร็ว ณ ช่วงเวลาที่มีค่าแกว่งกลับไป

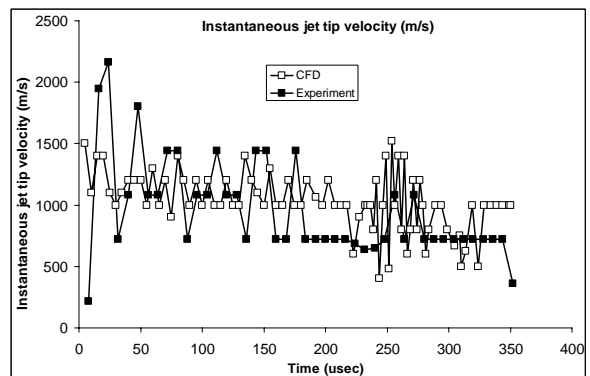
กลับมา ในช่วงความเร็วสูงสุด (1300 m/s) และเป็นสิ่งที่สังเกตว่าความกว้างของช่วงการแกว่งจากการทดลองมีค่ามากกว่าจาก CFD



รูปที่ 3 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งของน้ำมันก๊าด



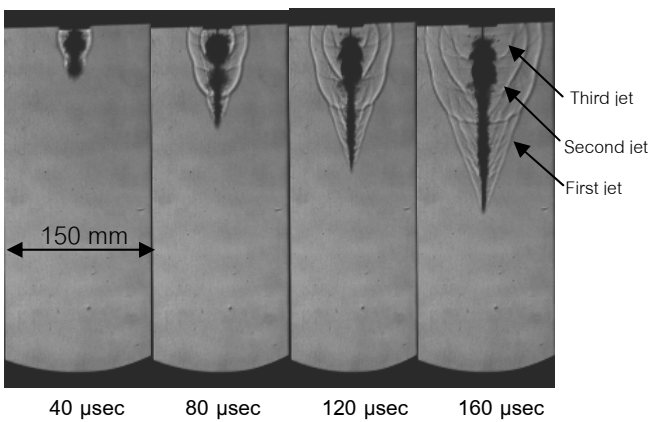
รูปที่ 4 ระยะแหวกอากาศของลำพุ่งของน้ำมันก๊าด



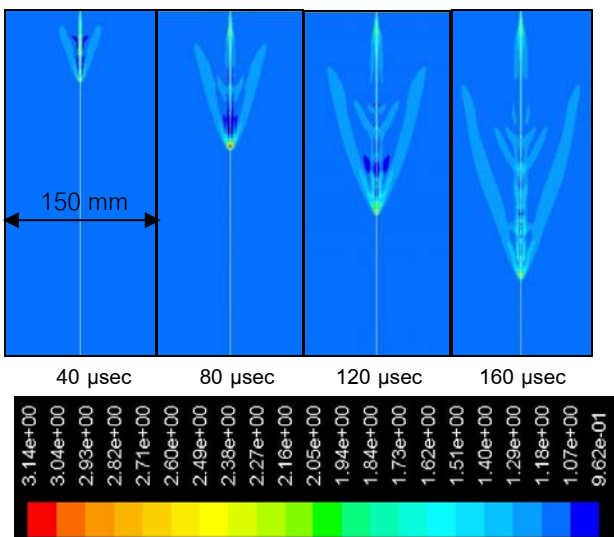
รูปที่ 5 ความเร็วช่วง ณ ช่วงเวลาของลำพุ่งของน้ำมันก๊าด

4.2 ลำพู่ของน้ำมันก๊าดความเร็วสูง

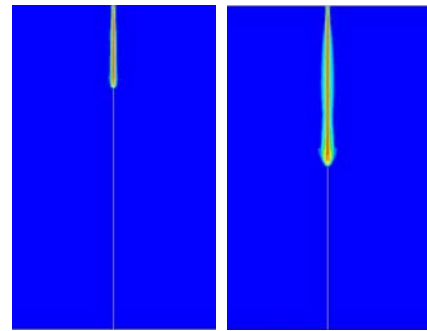
ภาพของลำพู่ไขมันก๊าดความเร็วสูงที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 6 ซึ่งสามารถแสดงการเกิด shock อย่างชัดเจนและพบพฤติกรรมของลำพู่ที่มีหลายลูก ดังแสดงในรูปที่ 6. ซึ่งผลของ CFD ก็สนับสนุน และแสดงให้เห็นปรากฏการณ์ shock เช่นเดียวกัน เมื่อแสดงความหนาแน่นของอากาศ เราพบการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นผลจาก shock แสดงดังรูปที่ 7 ทั้งนี้ผลของ CFD ยืนยันการเกิด shock มากกว่าหนึ่งลูกแม้ว่าจะไม่ชัดเจนดังเช่นกับการทดลอง เนื่องจากความแตกต่างกันของขบวนการสร้างลำพู่และเงื่อนไขการฉีดในหัวฉีด และเมื่อเปรียบเทียบภาพที่ช่วงเวลาเดียวกันจะเห็นว่ารูปร่างลำพู่มีความใกล้เคียงกัน แต่ระยะแหวกอากาศของแต่ละช่วงเวลา มีความแตกต่างกันอยู่มากซึ่งผลของ CFD ให้ความยาวมากกว่า ณ ช่วงเวลาเดียวกัน



รูปที่ 6 ภาพลำพู่ของน้ำมันก๊าดจากการทดลองตามเวลาที่เปลี่ยนแปลง

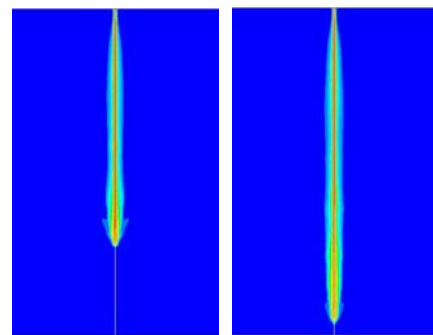


รูปที่ 7 แถบสีความหนาแน่นของอากาศที่ได้จาก CFD โดยเปลี่ยนแปลงตามเวลา



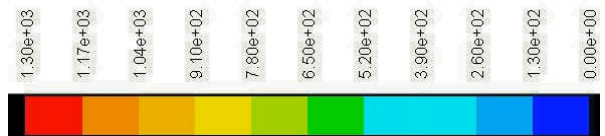
40 μsec

80 μsec



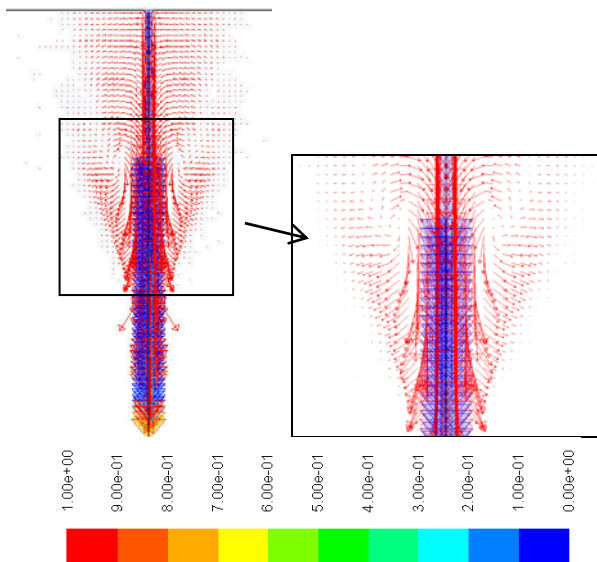
120 μsec

160 μsec



รูปที่ 8 แถบสีความเร็วของลำพู่จาก CFD ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

แถบสีของความเร็วที่แสดงได้จากการคำนวณแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งสังเกตเห็นว่าในช่วงเริ่มต้น (0 - 40 μsec) ความเร็วของส่วนที่เป็นน้ำมันก๊าดเท่านั้นที่ความเร็วสูงอยู่ แต่หลังจากนั้น ความเร็วของลำพู่จะเริ่มลดลงและอากาศรอบๆจะถูกเหวี่ยงทำให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการผสมกันและถ่ายเทพลังงานโมเมนตัม ระหว่างของเหลวและอากาศ ซึ่งอากาศจะถูกเหวี่ยงมาให้ผสมกับลำพู่ การเคลื่อนที่ของอากาศและลักษณะการผสมกันของอากาศกับลำพู่แสดงด้วยเวคเตอร์ตามรูปที่ 9 ซึ่งสามารถเห็นการไหลวนของอากาศที่โคนของลำพู่และความเร็วของอากาศที่บริเวณดังกล่าวจะสูงกว่าอากาศที่บริเวณอื่น



รูปที่ 9 เวกเตอร์ความเร็วกับแถบสีอัตราส่วนเชิงปริมาตรของอากาศที่
เวลา 20 μ sec

5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้เริ่มต้นศึกษาลำพุ่งของน้ำมันที่ความเร็วสูง ด้วยการคำนวณพลศาสตร์การไหลหรือ CFD ที่สภาวะความเร็วเริ่มต้นของลำพุ่ง 1300 m/s ได้เป็นผลสำเร็จ ซึ่งเป็นความก้าวหน้าที่สามารถคำนวณการไหลของของไหลแบบก่อดัดได้ที่มีความเร็วสูงและมีของไหลมากกว่าหนึ่งชนิด เราได้วิเคราะห์คุณลักษณะพื้นฐานของลำพุ่งโดยเปรียบเทียบกันระหว่างการทดลองและ CFD พบว่าผลของทั้งสองวิธีสอดคล้องกัน ถึงแม้ว่ากระบวนการสร้างลำพุ่งจะแตกต่างกัน ซึ่งเหตุดังกล่าวทำให้ผลบางประการไม่สอดคล้องกัน ดังนั้นเพื่อให้ผลของ CFD มีค่าที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาแบบจำลองที่สามารถสร้างลำพุ่งให้ใกล้เคียงกับการทดลอง นอกจากนี้แล้วการศึกษาในระดับต่อไปควรพิจารณาผลของการเกิดและกระจายตัวของหยดละอองจากเชื้อเพลิงเหลวด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนด้านเงินทุนวิจัยในการศึกษาครั้งนี้ อีกทั้งกลุ่มร่วมวิจัยจากสถาบัน Interdisciplinary Shock Wave Research Laboratory (ISWRL), Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan มา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Nishida, K., Ochiai, H., Arai, M., Hiroyasu, H., 1997. Characterization of Diesel Fuel Spray by Ultrahigh-Pressure Injection. Transaction of Japanese Society of Mechanical Engineering, series B 63 (605). pp. 344 -349.

[2] Hiroyasu, H., 1995. Fundamental Spray Combustion Mechanism and Structure of Fuel Sprays in Diesel Engine. Begell House, New York.

[3] Milton, B.E., and Pianthong, K., 2005. Pulsed, Supersonic Fuel Jet – A Review of Their Characteristics and Potential for Fuel Injection. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 25, pp. 656-671.

[4] Shi H.H., 1994. Study of Hypersonic Liquid Jet. PhD Thesis, Tohoku University, Sendai, Japan.

[5] Pianthong, K., 2002. Supersonic Liquid Diesel Fuel Jets: Generation, Shock Wave Characteristics, Auto-Ignition Feasibilities. University of New South Wales, Sydney, Australia.

[6] Zakrzewski, S., Milton, B.E., Pianthong, K., and Behnia, M., 2004. Supersonic Liquid Fuel Jet Injected Into Quiescent Air. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 25, pp. 833-840.

[7] Pianthong, K., Mutthujak, A., Takayama, K., Saito., and Milton, B. 2006. Visualization of Supersonic Liquid Fuel Jets. Journal of Flow Visualization and Image Processing, Vol. 30, pp. 217-242.

[8] Bowden, F.P., and Brunton, J.H., 1958. Damage to Solids by Liquid Impact at Supersonic Speed. Nature, Vol. 213, pp. 23-25.

[9] Matthujak, A., Hosseini, S.H.R., Takayama, K., Sun, M., and Voinovich, P., 2007. High Speed Jet Formation by Impact Acceleration Method. Shock Waves Journal (in pressed).