



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การหาการกระจายตัวขนาดหยดและความเข้มข้น
ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์ไบโอดีเซลแบบหน้าตัดกรวย
กลวงโดยใช้เทคนิคการคำนวณกลับเอนโทรปีสูงสุดกับข้อมูล
การเลี้ยวเบนของแสง

โดย ผศ.ดร. พิสิฐ ยงยิ่งศักดิ์ถาวร

มีนาคม 2559

สัญญาเลขที่ MRG5680145

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การหาการกระจายตัวขนาดหยดและความเข้มข้น
ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์ใบโอดีเซลแบบหน้าตัดกรวย
กลวงโดยใช้เทคนิคการคำนวณกลับเอนโทรปีสูงสุดกับข้อมูล
การเลี้ยวเบนของแสง

ผศ.ดร. พิสิฐ ยงยิ่งศักดิ์ถาวร

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย
สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG5680145

ชื่อโครงการ : การหาการกระจายตัวของขนาดหยดและความเข้มข้น ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์
ไบโอดีเซลแบบหน้าตัดกรวยกลวงโดยใช้เทคนิคการคำนวณกลับเอนโทรปีสูงสุด
กับข้อมูลการเลี้ยวเบนของแสง

ชื่อนักวิจัย : นาย พิสิฐ ยงยิ่งศักดิ์ถาวร

E-mail Address: pisit.y@eng.kmutnb.ac.th, pisit_y@hotmail.com

ระยะเวลาโครงการ : 1 ปี

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาการกระจายตัวของขนาดหยดและความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์ไบโอดีเซลชนิดหน้าตัดกรวยกลวง โดยใช้เทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดกับข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของแสง งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก คือ การตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมของเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดเพื่อหาความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ โดยอาศัยหัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวง (Hollow-cone pressure swirl atomizer) และการศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลเพื่อเปรียบเทียบกับสเปรย์ของดีเซล รวมทั้งดูผลกระทบจากการเพิ่มอุณหภูมิของไบโอดีเซล

จากผลการศึกษาที่ได้ พบว่าอัลกอริทึมมีความถูกต้องน่าเชื่อถือ เนื่องจากได้ผลการคำนวณของค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ ที่ตรงกลางหน้าตัดสเปรย์กรวยกลวงมีค่าเท่ากับศูนย์แสดงถึงการไม่มีอยู่ของสเปรย์ และเมื่อนำอัลกอริทึมดังกล่าวมาหาการกระจายตัวของขนาดหยดและความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์ไบโอดีเซลและดีเซลที่ 30°C พบว่าสเปรย์ของไบโอดีเซลมีขนาดหยดที่ใหญ่กว่าโดยเฉพาะบริเวณระหว่างตรงกลางและขอบของหน้าตัดสเปรย์ เนื่องจากความหนืดที่สูงกว่า ขณะที่ความเข้มข้นเชิงปริมาตรมีแนวโน้มน้อยกว่าที่ด้านขอบนอกของสเปรย์เนื่องจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของการไหลหรือความเร็วในแนวรัศมีของ conical sheet มีค่าน้อยกว่า เมื่อให้ความร้อนกับไบโอดีเซลจนมีอุณหภูมิ 55°C จะทำให้สเปรย์มีคุณลักษณะโครงสร้างภายในใกล้เคียงกับสเปรย์ของดีเซล

คำหลัก: การกระจายตัวของขนาดหยด ความเข้มข้นเชิงปริมาตร สเปรย์ไบโอดีเซลแบบหน้าตัดกรวยกลวง เทคนิคการคำนวณกลับเอนโทรปีสูงสุด เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง

Abstract

Project code : MRG5680145

Project Title : Determination of Local Drop Size Distribution and Concentration of
Hollow-Cone Biodiesel Spray by Applying the Maximum Entropy
Reconstruction Technique on Laser-Diffraction Data

Researcher : Pisit YONGYINGSAKTHAVORN

E-mail Address: pisit.y@eng.kmutnb.ac.th, pisit_y@hotmail.com

Duration : 1 year

This research aims to determine local drop-size distribution and local volume concentration of a hollow-cone biodiesel spray by using the maximum entropy (ME) tomographic reconstruction on the laser diffraction data. There are two main parts of work. First, an algorithm of the ME tomographic reconstruction for local volume concentration is validated by using hollow-cone pressure swirl atomizers. Second, biodiesel spray from such kind of atomizer is studied and compared with diesel spray, the effects of biodiesel heating is also observed.

The results show that the algorithm works well. The local volume concentration is found to be zero at the center core of the hollow-cone spray section, implying that there are no drops. When applying the algorithm for biodiesel and diesel sprays at temperature of 30°C, it is found that the biodiesel spray has coarser drops at region between the center and the edge of the spray section due to its higher viscosity. While the volume concentration tends to be lower at the outer region of spray section, because of lower centrifugal force of flow and radial velocity of conical sheet. However, the spray characteristics of biodiesel is closer to that of diesel spray when biodiesel is heated up to 55°C.

Keywords: drop-size distribution, volume concentration, hollow-cone biodiesel spray, ME tomographic reconstruction, laser diffraction technique

Executive summary

งานวิจัยนี้เป็นงานต่อยอดจากงานวิจัยก่อนหน้า โดยงานวิจัยก่อนหน้าได้พัฒนาเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดสำหรับข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของแสงเพื่อหาค่าการกระจายตัวของขนาดหยด $f_v(D)$ และความเข้มข้นเชิงปริมาตร $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งใดๆ โดยได้ทำการทดลองกับสเปรย์แบบหน้าตัดกรวยเต็ม (solid-cone) เท่านั้น สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมของเทคนิคดังกล่าวได้อาศัยการวัดด้วยเทคนิค Phase Doppler Particle Anemometry (PDPA) มาเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบค่า $f_v(D)$ พบว่าอัลกอริทึมของเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ ขณะที่อัลกอริทึมสำหรับหาค่า $C_{v,k}$ ยังไม่มีวิธีในการตรวจสอบความถูกต้อง นอกจากนี้หัวใจที่ใช้ในหัวเผาอุตสาหกรรมส่วนมากเป็นหัวใจความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวง การศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลจากหัวฉีดดังกล่าวจึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลที่ได้จากหัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวง โดยใช้เทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดกับข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของแสง โดยงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก คือ การตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมของเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดเพื่อหาความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ โดยอาศัยหัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวง และการศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลเพื่อเปรียบเทียบกับสเปรย์ของดีเซล รวมทั้งดูผลกระทบจากการเพิ่มอุณหภูมิของไบโอดีเซล

ในการตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึม พบว่าหัวฉีดความดันหมุนวนประเภทหน้าตัดกรวยกลวง ได้แสดงผลของความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งตรงกลางสเปรย์ ($r_k = 0$ mm) มีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงถึงการไม่มีหยดอยู่ในบริเวณตรงกลางที่เป็นพื้นที่ของกรวยกลวง จึงสามารถสรุปได้ว่าอัลกอริทึมของเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดที่พัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยก่อนหน้ามีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ สำหรับการศึกษเบื้องต้นของโครงสร้างสเปรย์น้ำที่ได้จากหัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวง PLP และ PL ขนาด 2.5 GPH พบว่าสเปรย์ของหัวฉีดหน้าตัดกรวยกลวง (type PLP และ PL) มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับสเปรย์หน้าตัดกรวยเต็ม (type R) ในงานวิจัยก่อนหน้า ทั้งนี้เนื่องจากเป็นหัวฉีดความดันหมุนวนเหมือนกัน จึงมีกลไกการแตกตัวประเภทเดียวกัน โดยพบว่าบริเวณตรงกลางหน้าตัดของสเปรย์จะมีหยดขนาดเล็กมาก และจะมีหยดขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเลื่อนออกไปยังขอบของหน้าตัดสเปรย์

ในการวัดหาคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงเบื้องต้นพบว่าผลการวัดการกระจายตัวของขนาดหยดในแนววิถี $f_v(D)$ ได้แสดงความแตกต่างระหว่างสเปรย์ของไบโอดีเซล 30 °C และดีเซล 30 °C เล็กน้อย โดยสเปรย์ของไบโอดีเซล 30 °C จะหยากกว่าเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของไบโอดีเซลเป็น 55 °C พบว่ามีการกระจายตัวของ

ขนาดหยดใกล้เคียงกับของสเปรย์ดีเซล เพราะความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามผลในแนววิถีนี้นี้ ไม่สามารถบอกได้ว่าโครงสร้างภายในสเปรย์เหมือนกันหรือไม่อย่างไร

เมื่อได้ทำการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดเพื่อหาการกระจายตัวของขนาดหยด และความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ พบว่ากรวยกลวงของสเปรย์น้ำมัน มีขนาดเล็กกว่ากรณีของน้ำ โดยพบว่าหน้าตัดสเปรย์ของน้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ไม่พบหยดที่ตำแหน่งกึ่งกลางหน้าตัด ($r_k = 0$ mm) ที่ระยะห่างจากหัวฉีด $z = 10$ mm เท่านั้น (เงื่อนไขทดสอบ $\Delta P = 10$ bar และ $z = 10, 20$ และ 30 mm) สาเหตุที่ไม่พบกรวยกลวงบนหน้าตัดสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ระยะ $z = 20$ และ 30 mm เหมือนกับกรณีของสเปรย์น้ำ เนื่องจากความหนืดมีค่าสูงกว่า ทำให้มีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของการไหลและความเร็วของ conical sheet ในทิศ axial และ radial น้อยลง ทำให้ air entrainment สามารถพลักหยดขนาดเล็กเข้ามาถึงกลางสเปรย์ได้เร็วขึ้น ขนาดของกรวยกลวงจึงมีแนวโน้มเล็กลง

เมื่อเปรียบเทียบสเปรย์ของไบโอดีเซลและดีเซล พบว่าสเปรย์ไบโอดีเซลหยาบกว่าสเปรย์ดีเซลที่อุณหภูมิเดียวกันที่ 30°C โดยเฉพาะบริเวณที่อยู่ระหว่างกึ่งกลางกับขอบของหน้าตัดสเปรย์ ซึ่งเป็นบริเวณ downstream ของการแตกตัวของ conical sheet ขณะที่บริเวณด้านในตรงกลางของหน้าตัดสเปรย์จะมีขนาดหยดใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของไบโอดีเซลเป็น 55°C พบว่าสเปรย์มีขนาดหยดเล็กลงโดยเฉพาะบริเวณขอบของหน้าตัดสเปรย์ และทำให้สเปรย์ของไบโอดีเซลที่ 55°C มีความละเอียดใกล้เคียงกับของสเปรย์ดีเซล สำหรับผลกระทบของการเพิ่มความดันฉีด พบว่าทำให้สเปรย์มีขนาดหยดเล็กลงโดยเห็นได้ชัดที่บริเวณขอบของหน้าตัดสเปรย์ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความดันฉีดยังทำให้เห็นความแตกต่างของขนาดหยดน้อยลงในสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง นั่นคือ ผลกระทบของความหนืดน้อยลงเมื่อความดันฉีดมีค่ามากขึ้น

สำหรับค่าของ $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์หน้าตัดกรวยกลวง พบว่าค่า $C_{v,k}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามแนวรัศมีของหน้าตัดสเปรย์ จากกึ่งกลางของหน้าตัด จนถึงค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง downstream ของการแตกตัวของ conical sheet จากนั้นจึงเริ่มมีค่าลดลงจนถึงขอบด้านนอก ซึ่งคล้ายคลึงกับสเปรย์หน้าตัดกรวยเต็ม เมื่อพิจารณาค่าของ $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งใดๆ ของน้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่ามีความใกล้เคียงกันมาก แต่อย่างไรก็ตาม น้ำมันที่มีความหนืดน้อยกว่า จะมีแนวโน้มให้ค่า $C_{v,k}$ สูงกว่าที่ขอบด้านนอกของสเปรย์ตามที่พบในกรณีของสเปรย์ดีเซล เนื่องจากความหนืดน้อย ทำให้ conical sheet มีความเร็วในแนว radial มาก

สำหรับการวัดที่ระยะ z ต่างๆ พบว่าค่า $C_{v,k}$ มีแนวโน้มลดลงและมีกระจายที่แบบราบมากขึ้น ตาม downstream หรือที่ระยะ z เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของสเปรย์มีขนาดใหญ่ขึ้น ค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตรจึงถูกเจือจางลง อย่างไรก็ตามที่กึ่งกลางสเปรย์กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีสาเหตุมาจาก air entrainment ที่พลักหยดขนาดเล็กมากเข้ามายังกึ่งกลางสเปรย์มากขึ้นตามระยะ downstream ที่เพิ่มขึ้น จนอาจปรากฏค่า $C_{v,k}$ ไม่เท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งตรงกลางของสเปรย์ได้ ดังเช่น กรณีของหัวฉีด PLP ที่ระยะ $z = 40$ mm

จากผลการดำเนินงานของโครงการวิจัย พบว่าการใช้เทคนิคคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดรวมกับการวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงเพื่อหาการกระจายตัวของขนาดหยดและความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ นี้ มีประสิทธิภาพและน่าเชื่อถือ สามารถนำมาใช้ในการศึกษาคุณลักษณะโครงสร้างภายในของสเปรย์ที่มีความสมมาตรในแนวแกนได้เป็นอย่างดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
Executive Summary	ค
สารบัญ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เทคนิคการวัดหาขนาดอนุภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของแสง	4
2.2 การคำนวณกลับเพื่อหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ณ ตำแหน่งใด ๆ	6
2.3 การคำนวณกลับเพื่อหาค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ	9
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	11
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	11
3.2 การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาแบบแผนการทดลองที่เหมาะสม	14
3.3 รายละเอียดการทดลองของโครงการวิจัย	20
3.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมและศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์น้ำเบื้องต้น	20
3.3.2 การศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลเพื่อเปรียบเทียบกับสเปรย์ของดีเซล	22
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานของโครงการ	24
4.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมและการศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์น้ำเบื้องต้น	24
4.1.1 การกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตรในแนววิถี	24
4.1.2 การกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ	26
4.1.3 ความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ	32
4.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลเพื่อเปรียบเทียบกับสเปรย์ของดีเซล	38
4.2.1 การกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตรในแนววิถี	38
4.2.2 การกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ	38
4.2.3 ความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ	44

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานของโครงการ	51
5.1 สรุปการตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริธึมและศึกษาคุณลักษณะของ สเปรย์น้ำเบื้องต้น	51
5.2 สรุปการศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลเพื่อเปรียบเทียบกับ สเปรย์ของดีเซล	52
5.3 ข้อเสนอแนะ	54
เอกสารอ้างอิง	55
ภาคผนวก	57
ก. ปัญหาและอุปสรรค	57
ข. Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากวิกฤตน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผ่านมา ทำให้น้ำมันไบโอดีเซล (Biodiesel) กลายเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้ [1-8] และไม่เพียงแต่เฉพาะในเครื่องยนต์เท่านั้น ยังรวมถึงการใช้งานในเตาอุตสาหกรรมทั่วไปด้วย [9-11]

การแตกตัวเป็นละอองสเปรย์ (atomization) มีความสำคัญเป็นอันดับแรกในกระบวนการเผาไหม้ ละอองสเปรย์ที่ละเอียด (fine spray) จะทำให้ของเหลวมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ทำให้เชื้อเพลิงผสมกับอากาศได้ดีและสามารถระเหยได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการลดลงของขนาดหยดเฉลี่ยของเชื้อเพลิงจะช่วยให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น จุดติดไฟได้ง่ายขึ้น มีช่วงของการเผาไหม้ที่กว้างขึ้น (Turndown ratio) และเกิดมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมน้อยลง ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการแตกตัวเป็นละอองสเปรย์ คือ ค่าความหนืดของเชื้อเพลิง [12] ปัญหาหลักของการใช้น้ำมันไบโอดีเซลคือน้ำมันไบโอดีเซลมีความหนืดที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล [13] ซึ่งอาจส่งผลทำให้การแตกตัวเป็นละอองสเปรย์ได้ไม่ดี [14, 15] ดังนั้นการทดลองวัดหาคุณลักษณะของสเปรย์น้ำมันจึงเป็นขั้นตอนแรกที่สำคัญในการวิจัยการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเหลว

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ มีการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการเผาไหม้ของน้ำมันไบโอดีเซลโดยไม่ได้มีการตรวจวัดหาคุณลักษณะของสเปรย์ซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการเผาไหม้ แม้ว่าจะมีบางงานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะของสเปรย์น้ำมันไบโอดีเซลอยู่บ้าง แต่ข้อมูลเกี่ยวกับการกระจายตัวของขนาดหยดของสเปรย์น้ำมันนั้นยังไม่เพียงพอ

Allen และ Watts [12] ได้ทำการทดลองหาคุณลักษณะการแตกตัวของสเปรย์น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากพืช 5 ชนิด ได้แก่ น้ำมันคาโนลา (Canola oil), น้ำมันมะพร้าว (Coconut oil), น้ำมันปาล์ม (Palm oil), น้ำมันถั่วลิสง (Peanut oil) และน้ำมันถั่วเหลือง (Soya oil) โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง Malvern 2600 (Laser diffraction particle sizer) มาวัดและวิเคราะห์คุณลักษณะของสเปรย์น้ำมันที่ฉีดจากระบบฉีดน้ำมันดีเซล โดยทำการเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเทอร์ (Sauter mean diameter - SMD) และพารามิเตอร์ของโมเดลการกระจายตัวโรซินแรมเลอร์ (Rosin-Rammler distribution) ของสเปรย์น้ำมันทั้ง 5 ชนิด ร่วมกับน้ำมันดีเซล จากผลการทดลองที่ได้พบว่าคุณลักษณะการแตกตัวระหว่างน้ำมันไบโอดีเซลจากมะพร้าว (Coconut methyl ester) กับน้ำมันดีเซลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะ ในขณะที่น้ำมันไบโอดีเซลตัวอื่นๆ มีการแตกตัวเป็นละอองสเปรย์ที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้น Allen และ Watts ยังทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของขนาดหยดระหว่างน้ำมันดีเซล น้ำมันไบโอดีเซลจากคาโนลา (Canola methyl ester) และน้ำมันพืชคาโนลาบริสุทธิ์ (Pure canola oil) ผลการทดลองได้แสดงข้อแตกต่างของน้ำมันทั้ง 3 แบบ พบว่ากราฟการกระจายตัวของขนาดหยดของน้ำมันพืชคาโนลาบริสุทธิ์มีรูปร่างแบนและกว้าง คือ มีหยดขนาดใหญ่อยู่หลายขนาด ซึ่งนำไปสู่การเผาไหม้ที่ไม่มี

ประสิทธิภาพในเครื่องยนต์ดีเซลได้ อย่างไรก็ตามงานของ Allen และ Watts ได้แสดงแต่ลักษณะการกระจายตัวของขนาดหยดสเปรย์ในแนววิถี ซึ่งไม่สามารถอธิบายถึงคุณลักษณะภายในของสเปรย์ที่อาจมีความแตกต่างกันได้ Malvern Spraytec เป็นเครื่องมือวัดขนาดของอนุภาคในแนววิถี (line-of-sight measurement) ที่เหมาะกับสเปรย์ความเร็วสูง โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Laser diffraction technique) ที่นับรวมเอาผลของการหักเหไปด้านหน้า (Forward refraction) หากต้องการข้อมูลของคุณลักษณะภายในของสเปรย์หรือ ณ ตำแหน่งใด ๆ (local) นั้นจำเป็นต้องใช้เทคนิคการคำนวณกลับโทโมกราฟิก (Tomographic reconstruction technique) หรือเทคนิคดีคอนโวลูชัน (Deconvolution technique) มาประยุกต์ใช้กับข้อมูลการเลี้ยวเบนของแสงเพื่อแปลงข้อมูลจากแนววิถีเป็น ณ ตำแหน่งใดๆ

งานวิจัยหลายงานได้นำวิธีเอเบลทรานซ์ฟอร์มเมชัน (Abel transformation) หรือ โอเนียนฟิลลิ่ง (onion peeling) มาใช้ในการแก้ปัญหาโทโมกราฟิกสำหรับสเปรย์แบบสมมาตรเพื่อหาการกระจายตัวของขนาดหยด ณ ตำแหน่งใดๆ [13-18] อย่างไรก็ตามพบว่าวิธีโอเนียนฟิลลิ่งมีข้อบกพร่องอยู่ 2 ประการ ข้อแรกคือ เกิดข้อผิดพลาดสะสม (Cumulative error) จากการคำนวณในแต่ละขั้นการคำนวณจากขอบเข้ด้านใน ทำให้ผลการคำนวณ ณ ตำแหน่งตรงกลางไม่ถูกต้อง สองผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมีบางค่าติดลบซึ่งเป็นการรายงานผลที่ไม่เป็นจริงจากข้อบกพร่องที่กล่าวมานั้นสามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุด (Maximum Entropy) Yongyingsakthavorn et al. [19] ได้พัฒนาเทคนิคการคำนวณกลับโทโมกราฟิกด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุด (ME tomographic reconstruction) และนำมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลการกระเจิงของแสงของสเปรย์หน้าตัดกรวยเต็ม (Solid cone spray) ซึ่งได้จากการวัดในแนววิถี จากตำแหน่งกึ่งกลางสเปรย์ไปยังขอบของสเปรย์ ผลการคำนวณกลับที่ได้ คือ ค่าของความเข้มของแสงที่กระเจิง ณ ตำแหน่งใดๆ ในสเปรย์ จากนั้นนำข้อมูลความเข้มของแสงนี้มาคำนวณหาการกระจายตัวของขนาดหยด ณ ตำแหน่งใดๆ และสุดท้ายได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณกลับกับเครื่องมือวัด Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA) ที่ให้ผลการวัด ณ ตำแหน่งใดๆ พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกันอย่างดี

เครื่องมือวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง ไม่ได้ให้การกระจายตัวของขนาดหยดเพียงอย่างเดียวแต่ยังสามารถให้ค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตรด้วยโดยมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Extinction coefficient) หรือค่าการส่งผ่าน (Transmission) Yongyingsakthavorn et al [20] จึงได้พัฒนาอัลกอริธึมการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดเพื่อหาค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ ด้วย โดยหากจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ณ ตำแหน่งใดๆ ที่ได้จากการคำนวณกลับอีกทีหนึ่ง อย่างไรก็ตามยังไม่มี การตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณกลับของค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใด เนื่องจากยังไม่มีวิธีใดที่ให้ข้อมูลประเภทเดียวกันเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบได้

จากงานวิจัยที่ได้ทบทวนมาข้างต้นได้แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์คุณลักษณะสเปรย์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามยังมีบางส่วนของสำคัญของงานที่ยังไม่ได้ถูกทำให้สมบูรณ์ กล่าวคือ อัลกอริธึมของเทคนิคการคำนวณกลับด้วย

วิธีเอนโทรปีสูงสุดได้ถูกพัฒนาและทดสอบภายใต้สเปรย์แบบสมมาตรประเภทหน้าตัดกรวยเต็มเพียงประเภทเดียว โดยยังไม่เคยถูกนำมาใช้ทดสอบกับสเปรย์แบบสมมาตรประเภทหน้าตัดกรวยกลวง (Hollow cone spray) ดังนั้นการทดสอบเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดกับสเปรย์แบบสมมาตรประเภทหน้าตัดกรวยกลวงจึงเป็นงานที่น่าสนใจ เพื่อให้การพัฒนาเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดของ Yongyingsakthavorn et al [19, 20] มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยการทดสอบเทคนิคการคำนวณกลับกับสเปรย์หน้าตัดกรวยกลวงน่าจะสามารถช่วยตรวจสอบความถูกต้องของค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ ที่ได้จาก การหาคำตอบด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดได้ เนื่องจากทราบเงื่อนไขว่าจะไม่มีหยดสเปรย์อยู่ตรงกลางหน้าตัดของสเปรย์ นอกจากนี้หัวฉีดความดันหมุนวน (Pressure swirl atomizer) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเตา (Industrial burners) ส่วนใหญ่เป็นสเปรย์ประเภทหน้าตัดกรวยกลวงสำหรับสเปรย์ประเภทหน้าตัดกรวยเต็มจะถูกจำกัดในการใช้งานกับเตาขนาดเล็กเท่านั้น ดังนั้นคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลที่ได้จากหัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวงจึงเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญในการพัฒนาประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อหาการกระจายตัวของขนาดหยดและความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์ไบโอดีเซลชนิดหน้าตัดวงแหวนหรือกรวยกลวง โดยใช้เทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดกับข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของแสง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 เทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อหาการกระจายตัวของขนาดหยดและความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ สามารถใช้ได้กับสเปรย์แบบหน้าตัดกรวยกลวง

1.3.2 สามารถทำการตรวจสอบความถูกต้องของความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ ที่ได้จากเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุด

1.3.3 ได้ข้อมูลคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซล ณ ตำแหน่งใดๆ ที่ได้จากหัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวงที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย สามารถทราบถึงความแตกต่างของการกระจายตัวของขนาดหยดและความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ ภายในสเปรย์ ข้อมูลนี้จะมีประโยชน์ต่องานออกแบบวิจัยหัวเผาและเตาเผาอย่างมาก

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับการวัดคุณลักษณะของสเปรย์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (laser diffraction technique) และเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุด (Maximum entropy tomographic reconstruction) เพื่อหาการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคและความเข้มข้น ณ ตำแหน่งใด ๆ

2.1 เทคนิคการวัดขนาดอนุภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของแสง

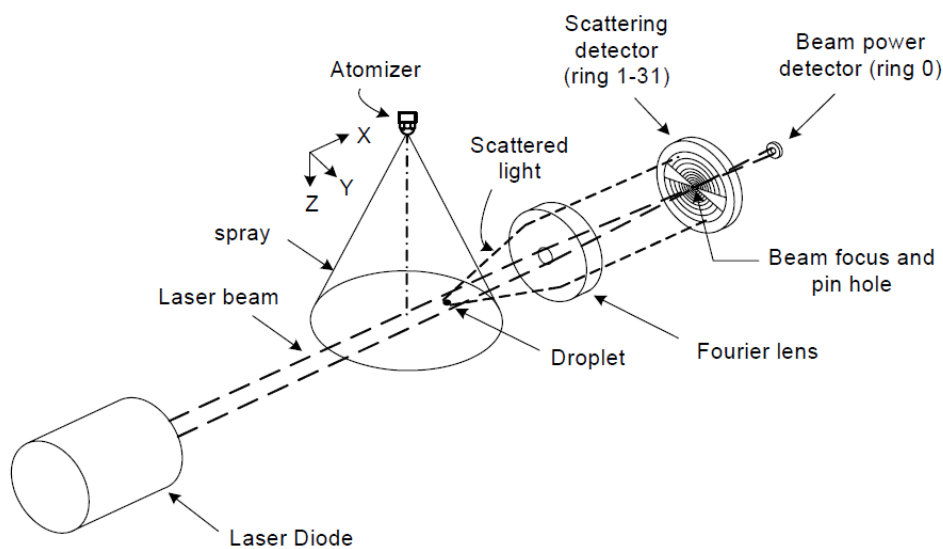
บริษัทมาลเวอร์นอินสตรูเมนต์จำกัด (Malvern Instruments Limited) ได้พัฒนาสิ่งประดิษฐ์รุ่น Malvern Spraytec ที่ใช้ทฤษฎีของลอเรนซ์มี (Lorenz-Mie Theory) โดยพิจารณาการหักเหของแสงด้านหน้าที่มีมุมขนาดเล็ก (small-angle forward refraction) ด้วย นอกเหนือจากการเลี้ยวเบนของแสง (diffraction) จึงสามารถใช้วัดขนาดของอนุภาคที่ไม่ทึบแสงได้อย่างถูกต้อง ข้อจำกัดของสิ่งประดิษฐ์นี้ คือ การวัดในแนววิถี (line-of-sight/path measurement) สามารถวัดการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคในแนววิถี (line-of-sight drop size distribution) และความเข้มข้นในแนววิถี (line-of-sight concentration) เท่านั้น แต่ไม่สามารถวัดการกระจายตัวของขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่งใด ๆ (local drop size distribution) และความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ (local volume concentration) ได้

ชุดเครื่องมือ Malvern Spraytec ประกอบด้วย เลเซอร์ไดโอด (Laser diode), เลนส์ (Lens), ตัวตรวจจับการกระเจิงของแสง (Light scattering detector) ซึ่งมี 31 วงแหวนไดโอด (ring 1 – 31) และ 1 ตัวตรวจจับกำลังของเลเซอร์ (Beam power detector) (ring 0) ดังรูปที่ 2-1 แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ประเภท HeNe (1-mW) ที่มีช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 670 nm โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเลเซอร์เท่ากับ 10 มิลลิเมตร เลนส์ที่ใช้เป็นเลนส์ฟูริเยร์ (Fourier lens) มีเลนส์ 3 ขนาดให้เลือกใช้ คือ ความยาวโฟกัส 100 mm, 200 mm และ 450 mm โดยสามารถวัดขนาดของอนุภาคได้ในช่วง 1.9 - 231.27 μm , 3.8 - 462.54 μm และ 8.56 - 1,040.72 μm ตามลำดับ อัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling rate/ data acquisition rate) สูงสุดที่สามารถวัดได้ คือ 2500 Hz

หลักการทำงานของชุดเครื่องมือนี้ คือ เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านลำแสง อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะให้มุมของการกระเจิงของแสงน้อยกว่าอนุภาคที่เล็กกว่า ทำให้สามารถแยกแยะขนาดของอนุภาคได้ โดยเลนส์ฟูริเยร์ (Fourier lens) จะทำหน้าที่รวมแสงที่มีมุมกระเจิงที่เท่ากันไปสะสมไว้ในวงแหวนไดโอดเดียวกัน การกระจายตัวของขนาดอนุภาคหรือหยดสเปรย์สามารถคำนวณได้จากการกระจายของความเข้มแสงบนตัวตรวจจับการกระเจิงของแสง ขณะที่ความเข้มข้นเชิงปริมาตรสามารถคำนวณได้จากค่าส่งผ่านของแสง (light transmission) ที่ได้จากการวัดความเข้มแสงที่ตัวตรวจจับกำลังของเลเซอร์ (ring 0)

Malvern Spraytec ให้ค่าการกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตรในแนววิถีที่เป็นเชิงระยะ (spatial volume-based drop-size distribution) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มของแสงกระเจิงที่วัดได้ในรูปสมการไม่ต่อเนื่อง (discrete form) ดังนี้

$$I(\theta) = C \times V(d) \quad (2.1)$$



รูปที่ 2-1 ส่วนประกอบของ Malvern Spraytec

โดยที่ $I(\theta)$ คือ ค่าความเข้มแสงที่กระเจิงจากอนุภาคที่วัดได้บนตัวตรวจจับการกระเจิงของแสง โดยมีเลนส์ฟूरियร์เป็นอุปกรณ์ที่รวมแสงที่มีมุมกระเจิงเท่ากันลงบนวงแหวนหรือไดโอดเดียวกัน C คือ ค่าฟังก์ชันการส่งผ่านของอุปกรณ์ (Instrument transfer function) $V(d)$ คือ ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตร (volume fraction) และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

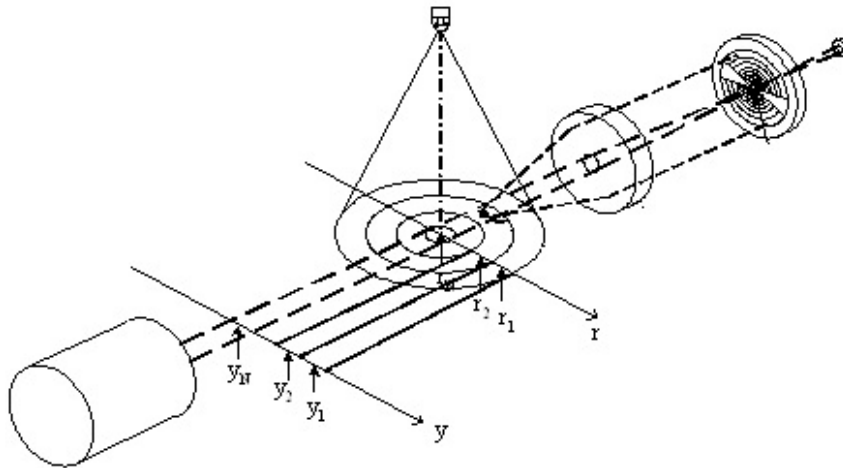
นอกจากนี้ Malvern Spraytec สามารถวัดหาความเข้มข้นในแนววิถีได้โดยใช้กฎของเบียร์แลมเบิร์ตดังสมการ

$$T = e^{-(1.5C_v L Q / D_{32})} \quad (2.2)$$

โดยที่ C_v คือ ค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตร (volume concentration) L คือ ความยาวในแนววิถีที่อนุภาคถูกส่องผ่านด้วยเลเซอร์ (optical path length) Q คือ ค่าประสิทธิภาพของการกระเจิงแสง (light scattering efficiency) D_{32} คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของซอเทอร์ (Sauter mean diameter) และ T คือ ค่าส่งผ่านของแสง (light transmission or transmittance)

2.2 การคำนวณกลับเพื่อหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ณ ตำแหน่งใด ๆ

การคำนวณกลับเป็นเทคนิคที่สามารถหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ณ ตำแหน่งใด ๆ ได้จากการวัดการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคในแนววิถี ปัญหาแบบนี้เรียกว่าปัญหาโทโมกราฟฟิก (tomographic problem) ในกรณีของการวัดสเปร์ย์ที่มีความสมมาตร (หรือตั้งสมมุติฐานว่าสมมาตร) ดังรูปที่ 2-2 สามารถทำการวัดเพียงครึ่งหนึ่งของหน้าตัดสเปร์ย์ได้โดยใช้แสงเลเซอร์จากเลเซอร์ไดโอดวัดตลอดจากจุดศูนย์กลางไปยังขอบของสเปร์ย์เป็นจำนวน N ครั้ง

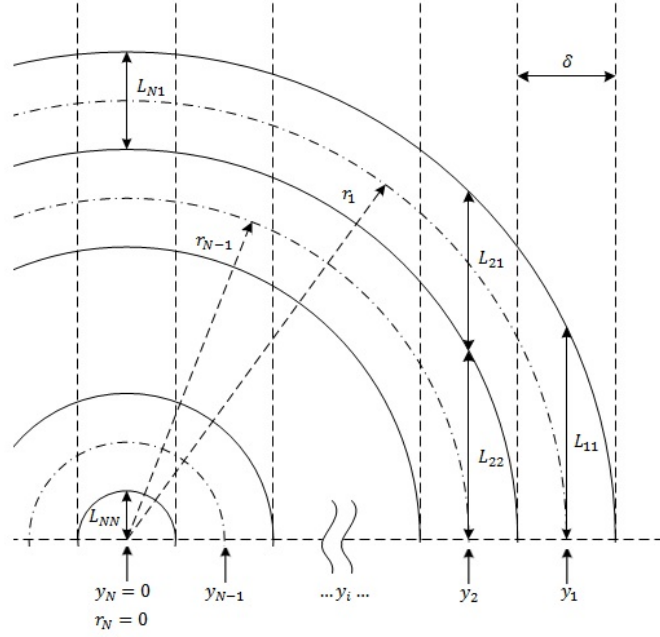


รูปที่ 2-2 ภาพแสดงการวัดด้วย Malvern Spraytec ตลอดครึ่งหนึ่งของหน้าตัดสเปร์ย์

โดยหน้าตัดของสเปร์ย์จะสามารถแบ่งออกได้เป็น N ส่วน ดังรูปที่ 2-2 ซึ่งประกอบด้วย $N-1$ วงแหวนและ 1 แกนกลาง จำนวนของวงแหวนนี้ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหน้าตัดสเปร์ย์และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง δ ของเลเซอร์ การวัดเริ่มต้นที่จุดศูนย์กลาง ณ ตำแหน่ง y_N ไปยังตำแหน่ง y_1 ที่ขอบของสเปร์ย์ ดังรูปที่ 2-3 โดยระยะห่างระหว่างจุดวัดแต่ละจุดมีค่าเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแสงเลเซอร์

ในการหาการกระจายตัวของขนาดหยด ณ ตำแหน่งใด ๆ จะใช้เทคนิคการคำนวณกลับกับการกระจายตัวของความเข้มแสงที่กระเจิงในแนววิถี (line-of-sight scattered light intensity distribution) $\bar{I}_j(y_{i=1...N})$ บนไดโอด j^{th} ของตัวตรวจจับ ความเข้มแสงที่กระเจิงในแนววิถี (line-of-sight scattered light intensities) ที่วัดได้จากการสแกนจำนวน N ครั้งบนหน้าตัดของสเปร์ย์เดียวกันจะถูกนำมาใช้คำนวณกลับหาความเข้มแสงที่กระเจิง ณ ตำแหน่งใด ๆ ต่อหนึ่งหน่วยความยาว (local scattered light intensities per unit path length) $I_j(r_{k=1...N})$ จำนวน N ค่า บนไดโอดนั้น ๆ ความเข้มแสงที่กระเจิงในแนววิถีมีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงที่กระเจิง ณ ตำแหน่งใด ๆ บนไดโอด j ใดๆ ดังนี้

$$\bar{I}_j(y_i) = 2 \sum_{k=1}^i L_{ik} I_j(r_k), \quad i = 1 \text{ ถึง } N \quad (2.3)$$



รูปที่ 2-3 ภาพการแบ่งหน้าตัดสเปรย์ออกเป็นวงแหวน

โดยที่ L_{ik} คือ ความยาวในแนววิถี ซึ่งหาได้จาก

$$L_{ik} = \sqrt{\left(r_k + \frac{\delta}{2}\right)^2 - r_i^2} - \sum_{m=k+1}^i L_{im} \quad (2.4)$$

สมการที่ (2.3) เป็นปัญหาทางด้านโทโมกราฟิที่อยู่ในรูปของสมการโมเมนต์ที่หนึ่ง (first moment) โดยที่ $\bar{I}_j(y_i)$ ได้จากการวัดและ $I_j(r_k)$ คือตัวแปรไม่ทราบค่าที่จะทำการหาด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุด (Maximum Entropy solution method) [19]

ในการหาค่าความเข้มแสงที่กระเจิงต่อหนึ่งหน่วยความยาว ณ ตำแหน่งใด ๆ โดยใช้วิธีเอนโทรปีสูงสุด ความเข้มแสงที่กระเจิงต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่ตำแหน่ง r_k (จะถูกเรียกว่าเซลล์ k^{th}) จะถูกจินตนาการเป็นจุลภาค (microstates) ที่ประกอบด้วยจำนวน z_{jk} บล็อกที่มีขนาด δI เท่ากัน (ดังนั้น $I_j(r_k) = z_{jk} \delta I$) ผลรวมของตัวแปรไม่ทราบค่าคือ

$$I_{ij} = \sum_{k=1}^N I_j(r_k) \quad (2.5)$$

หรือ

$$Z_j = \sum_{k=1}^N z_{jk} \quad (2.6)$$

ซึ่งอยู่ในรูปของตัวแปรจุลภาค โดยที่ $\mathbf{Z}_j$ คือ จำนวนรวมของบล็อก การจัดกลุ่ม (combination) ของ $\mathbf{Z}_j$ บล็อกใน $\mathbf{N}$ เซลล์ คือ

$$C_j = \frac{Z_j!}{\prod z_{jk}!} \quad (2.7)$$

เอนโทรปีถูกนิยามให้อยู่ในรูปของลอการิทึม (logarithm) ของการจัดกลุ่มของ $\mathbf{Z}_j$ บล็อกใน $\mathbf{N}$ เซลล์ ตามสมการดังนี้

$$S_j = \log \frac{Z_j!}{\prod z_{jk}!} = - \sum_{k=1}^N z_{jk} \log \left(\frac{z_{jk}!}{Z_j!} \right) \quad (2.8)$$

จากนั้นใช้วิธีลากรานจ์ (Lagrange's method) ของตัวคูณ (multiplier) γ_j และ β_{ij} จะได้ฟังก์ชันอ็อบเจกทีฟ (objective function) G_j คือ

$$G_j = S_j + \gamma_j \left(\sum_{k=1}^N z_{jk} - Z_j \right) + \sum_{i=1}^N \beta_{ij} \left(2 \sum_{k=1}^N L_{ik} z_{jk} - \bar{I}_j(y_i) \right) \quad (2.9)$$

โดย δI ได้ถูกรวมเข้ากับตัวคูณลากรานจ์ (Lagrange multipliers) β_{ij} จากนั้นหาค่าสูงสุดโดยหาอนุพันธ์ของ G_j เทียบกับ $\mathbf{z}_{jk}$ ซึ่งจะได้สมการของตัวแปร $\mathbf{z}_{jk}$ จำนวน $\mathbf{N}$ สมการ สุดท้ายจะได้คำตอบของเอนโทรปีสูงสุดคือ

$$z_{jk} = Z_j \frac{\exp \left(2 \sum_{i=1}^N \beta_{ij} L_{ik} \right)}{\sum_{k=1}^N \exp \left(2 \sum_{i=1}^N \beta_{ij} L_{ik} \right)} \quad (2.10)$$

หรือในรูปของ $I_j(\mathbf{r}_k)$

$$I_j(r_k) = I_{ij} \frac{\exp \left(2 \sum_{i=1}^N \beta_{ij} L_{ik} \right)}{\sum_{k=1}^N \exp \left(2 \sum_{i=1}^N \beta_{ij} L_{ik} \right)} \quad (2.11)$$

ค่า $I_j(r_k)$ สามารถหาได้โดยใช้อัลกอริธึมคำนวณซ้ำของบีเวนซี (Bevensee's Iterative Algorithm) สุดท้ายการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคที่ตำแหน่ง r_k ใดๆ จากความเข้มแสงที่กระเจิง ณ ตำแหน่งใด ๆ บนไดโอดทั้ง 31 ไดโอดที่ตำแหน่ง r_k เดียวกันได้ ดังสมการที่ (2.1)

2.3 การคำนวณกลับเพื่อหาค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ

วิธีการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดสามารถนำมาใช้หาความเข้มข้น ณ ตำแหน่งใด ๆ ได้ด้วยเช่นเดียวกัน โดยทั่วไปค่าการส่งผ่านแสง (Transmittance) มาจากสัดส่วนความสัมพันธ์ของความเข้มแสงหลังผ่านตัวกลาง (I_L) ต่อความเข้มแสงก่อนผ่านตัวกลาง (I_0) ดังสมการ

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.12)$$

กฎของเบียร์แลมเบิร์ตสามารถเขียนอยู่ในอีกรูปได้คือ

$$I_L = I_0 e^{-KL} \quad (2.13)$$

โดยที่ K คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน และ I เป็นความเข้มแสงหลังผ่านตัวกลางความยาว L ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปทั่วไปในรูปอินทิเกรตได้คือ

$$I_L = I_0 e^{-\int_L K(s) ds} \quad (2.14)$$

หรือ

$$-\ln T = -\ln \left(\frac{I_L}{I_0} \right) = \int_L K(s) ds \quad (2.15)$$

โดยค่า I_L และ I_0 เป็นค่าที่วัดได้จาก ring 0 ของเครื่องมือวัด Malvern Spraytec ในกรณีที่สเปรย์มีความสมมาตร สามารถเขียนสมการใหม่ในลักษณะเดียวกับสมการที่ (2.3) ได้คือ

$$\bar{K}(y_i) = 2 \sum_{k=1}^i L_{ik} K(r_k) \quad i = 1 \text{ ถึง } N \quad (2.16)$$

สมการที่ (2.16) เป็นปัญหาทางด้านโทโมกราฟิที่อยู๋ในรูปของสมการโมเมนต์ที่หนึ่ง (first moment) โดยที่ $\bar{K}_j(y_i)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนในแนววิถี “ที่ได้จากการวัด” และ $K_j(r_k)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ณ ตำแหน่งใด ๆ เป็นตัวแปรไม่ทราบค่าที่จะต้องทำการหาโดยใช้เทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ณ ตำแหน่งใด ๆ แล้ว ค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_{v,k} = \frac{2D_{32,k}K(r_k)}{3\bar{Q}_k} \quad (2.17)$$

โดยที่ D_{32} คือ ค่าหยดเฉลี่ยขอเทอร์ ณ ตำแหน่งใด ๆ และ $\bar{Q}$ คือค่าประสิทธิภาพของการกระเจิงแสงเฉลี่ย (mean light scattering efficiency) (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [20])

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

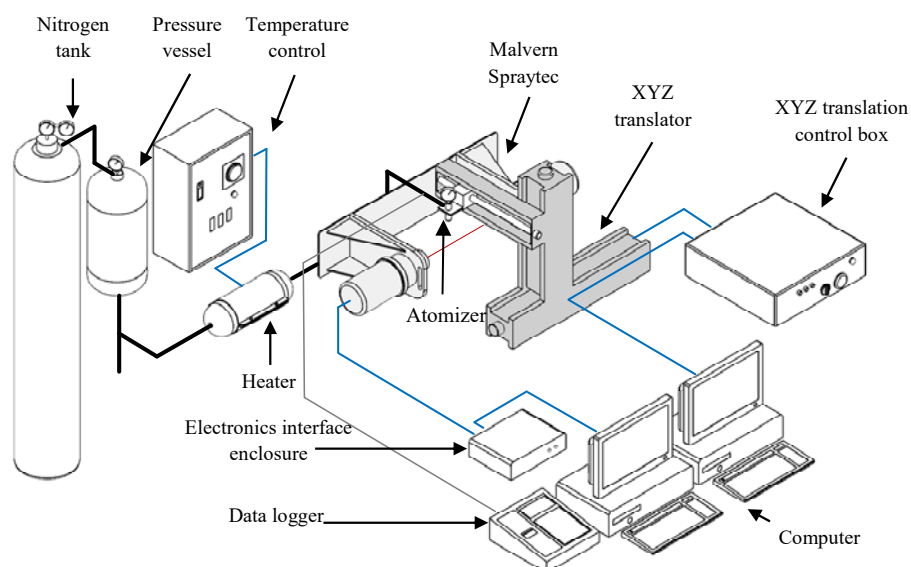
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาการกระจายตัวของขนาดหยดและความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์ไบโอดีเซลชนิดหน้าตัดวงแหวนหรือกรวยกลวง โดยใช้เทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดกับข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของแสง โดยงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนหลัก คือ (1) การตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมของเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดเพื่อหาความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ โดยใช้หัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวง (Hollow-cone pressure swirl atomizer) พร้อมทั้งศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์น้ำที่ได้จากหัวฉีดประเภทนี้ และ (2) การศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลเพื่อเปรียบเทียบกับสเปรย์ของดีเซล รวมทั้งดูผลกระทบจากการเพิ่มอุณหภูมิของไบโอดีเซล

ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง อุปกรณ์การทดลอง การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาแบบแผนการทดลองที่เหมาะสม และรายละเอียดการทดลองของโครงการวิจัย ซึ่งประกอบด้วย

- 1) การตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมและศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์น้ำเบื้องต้น และ
- 2) การศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลเพื่อเปรียบเทียบกับสเปรย์ของดีเซล

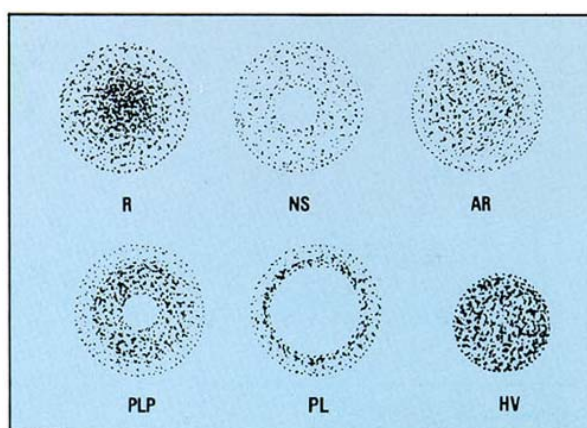
3.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 3-1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยมีอุปกรณ์หลัก คือ ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง เครื่องมือวัดขนาดหยด Malvern Spraytec และหัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวง



รูปที่ 3-1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

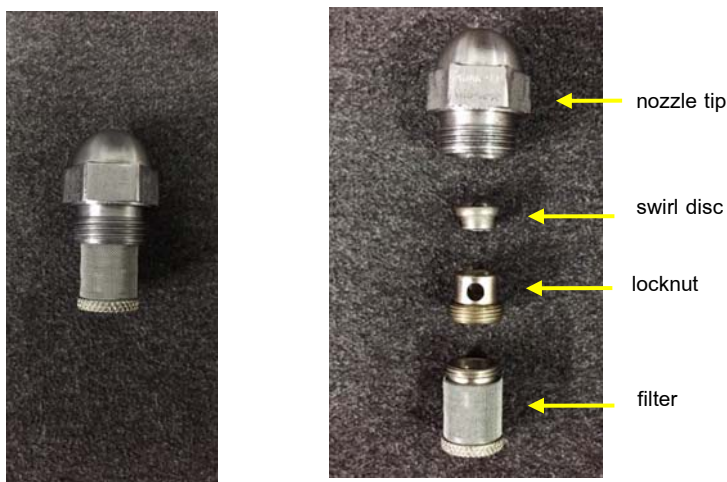
โดยหัวฉีดที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหัวฉีดยี่ห้อ Monarch ที่ใช้สำหรับหัวเผาน้ำมันในภาคอุตสาหกรรม (Oil Burner Nozzle) โดยมีหน้าตัดกรวยกลวงชนิด PLP และ PL ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ขนาดของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 2.25 GPH หรือแกลลอนต่อชั่วโมง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูออริฟิซของหัวฉีด 0.420 mm สำหรับ PL และ 0.415 mm สำหรับ PLP (ตารางที่ 3-1) รูปที่ 3-3 แสดงหัวฉีดและส่วนประกอบต่างๆ ของหัวฉีดทั้งสองชนิดซึ่งประกอบด้วย ตัวกรอง (filter) ตัวล็อก (locknut) แผ่นไหลหมุนวน (swirl disk) และตัวหัวฉีด (nozzle tip) โดยมีขนาดของแผ่นไหลหมุนวนดังรูปที่ 3-4



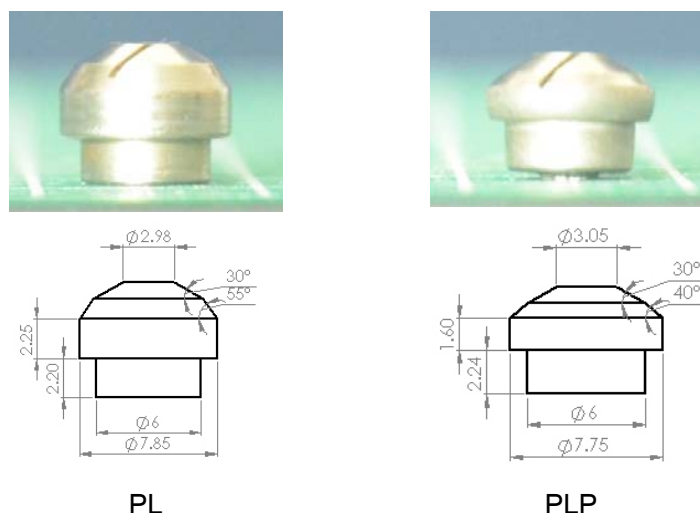
รูปที่ 3-2 รูปแบบหน้าตัดสเปรย์ของหัวฉีด Monarch ชนิดต่างๆ (Spray patterns) [21]

ตารางที่ 3-1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออริฟิซของหัวฉีด

หัวฉีด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางออริฟิซ (mm)
PL 2.25 GPH	0.420
PLP 2.25 GPH	0.415



รูปที่ 3-3 ส่วนประกอบของหัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวง Monarch



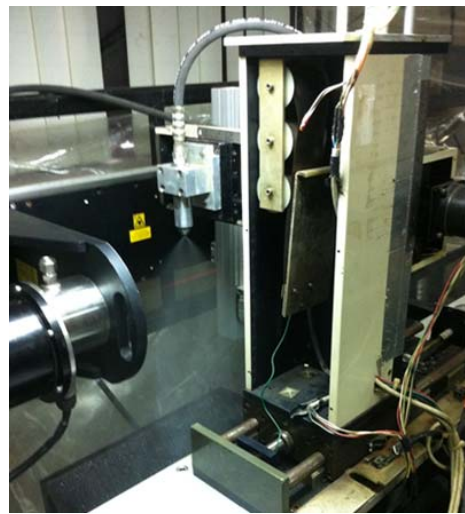
รูปที่ 3-4 แผ่นไหลหมุนวน (Swirl disc) ของหัวฉีด PL และ PLP

สำหรับของเหลวทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย น้ำ น้ำมันดีเซล และน้ำมันไบโอดีเซล โดยมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3-2 ของเหลวทดสอบจะถูกบรรจุอยู่ในถังความดัน (Pressure vessel) และถูกฉีดโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนอัดความดัน (pressurized nitrogen) ไหลผ่านระบบท่อและหัวฉีดความดันหมุนวน ความดันในการฉีดถูกควบคุมโดยใช้วาล์วเข็ม (Needle valve) เพื่อฉีดสเปรย์ของของเหลวทดสอบลงในแนวตั้ง อุณหภูมิของของเหลวทดสอบสามารถควบคุมได้ด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิและชุดทำความร้อน (Heater and Temperature controller) ตำแหน่งในการวัดของสเปรย์ (ด้วย Malvern Spraytec) สามารถกำหนดได้โดยใช้ชุดควบคุมการเลื่อนตามแนวแกน XYZ เลื่อนตำแหน่งของหัวฉีด

ละอองหยดสเปรย์ที่ถูกฉีดลงในแนวตั้งจะเคลื่อนที่ผ่านแสงเลเซอร์ของเครื่องมือวัด Malvern Spraytec ดังรูป 3-5 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเลเซอร์เท่ากับ 10 mm ปริมาตรของแสงเลเซอร์ที่หยดละอองสเปรย์เคลื่อนที่ผ่านคือ measurement volume ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตาม downstream จากการกระจายของละอองสเปรย์ เลนส์ฟิโบริที่ใช้มีความยาวโฟกัสเท่ากับ 200 mm สามารถวัดขนาดของอนุภาคได้ในช่วง 3.8 - 462.54 μm โหมดการทำงานถูกตั้งเป็นแบบ FLASH mode ที่สามารถตั้งค่า data acquisition rate ได้สูงสุด 2,500 Hz โดยในการวัดแต่ละครั้งของงานวิจัยนี้ได้กำหนดไว้เท่ากับ 1,250 Hz ในช่วงระยะเวลาของการเก็บข้อมูล 1 วินาทีหมายความว่าในการวัด 1 ครั้ง จะมีข้อมูลทั้งหมด 1250 ข้อมูล เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของผลการวัด ในการทดลองละอองสเปรย์จะถูกดักเก็บด้วยระบบสุญญากาศพร้อมตัวกรอง (vacuum system with filter) ที่ติดตั้งอยู่ด้านล่างของหัวฉีดดังรูปที่ 3-5

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของไหลของของไหลทดสอบ

คุณสมบัติ	น้ำ	ดีเซล	ไบโอดีเซล
ดัชนีหักเห (-)	1.333	1.46	1.45
ความหนืด @30°C (mm^2/s)	1	3.37	5.65



รูปที่ 3-5 แสดงวัดขนาดอนุภาคด้วย Malvern Spraytec

3.2 การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาแบบแผนการทดลองที่เหมาะสม

ส่วนแรกของงานวิจัย คือ การตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมของเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดเพื่อหาความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ โดยอาศัยสเปรย์หน้าตัดกรวยกลวงและใช้น้ำเป็นของเหลวทดสอบ หัวฉีดที่ใช้คือ PL และ PLP การตรวจสอบความถูกต้องนี้อาศัยข้อมูลความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งตรงกลางของหน้าตัดสเปรย์ โดยสเปรย์หน้าตัดกรวยกลวงควรแสดงค่าดังกล่าวเท่ากับศูนย์ คือ ไม่มีหยดสเปรย์ในบริเวณตรงกลาง และเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวจำเป็นต้องทำการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาแบบแผนการทดลอง (Experimental Protocol) ที่เหมาะสม

การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหา protocol ดังกล่าวเริ่มต้นด้วย การถ่ายภาพสเปรย์น้ำของหัวฉีด PLP เพื่อสังเกตการพัฒนาของสเปรย์แบบกรวยกลวงโดยใช้ความดันฉีด (ΔP) ตั้งแต่ 1 bar ถึง 13 bar โดยใช้กล้องถ่ายรูป Nikon DSLR D7200 ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3-6 โดยพบว่า การแตกตัวแบบ conical sheet ของสเปรย์หน้าตัดกรวยกลวงนี้มีการพัฒนาเหมือนกับสเปรย์หน้าตัดกรวยเต็ม (Solid-cone spray) ที่แสดงไว้ในงานวิจัยของ Poojitganont [22] และหนังสือที่เขียนโดย Lefebvre [23] กล่าวคือ เริ่มพัฒนาจาก Onion stage ในรูป ก) ไปสู่ Tulip stage ในรูป ข) เมื่อเพิ่มความดันมากขึ้น conical sheet มีการแตกตัวดีขึ้นดังรูป ค) เมื่อความดันเพิ่มขึ้นและมากกว่าประมาณ 7 bar ขึ้นไป พบว่าสเปรย์มีการพัฒนาอย่างเต็มที่ (Fully developed spray) ดังในรูป ง) จ) และ ฉ) จากภาพถ่ายนี้ไม่สามารถมองเห็นกรวยกลวงได้แม้ว่าจะใช้แสงเลเซอร์ส่องผ่าน (บริเวณที่มีหยดสเปรย์จะมีแสงสีแดงของเลเซอร์กระเจิงให้เห็น) สาเหตุมาจากเลเซอร์มีขนาดใหญ่เกินกรวยกลวงของหน้าตัดสเปรย์ จึงได้ตั้งคำถามว่า กรวยกลวงนั้นเกิดที่ใด ตลอดแกนกลางของสเปรย์ หรือเพียงบางระยะของหน้าตัดของสเปรย์ที่ห่างจากหัวฉีดเท่านั้น อย่างไรก็ตาม กรวยกลวงควรเกิดขึ้นที่บริเวณ downstream ถัดจากการแตกตัวของ Conical sheet เป็นหยด ดังที่เห็นในรูปที่ 3-6 ง) จ) และ ฉ) ซึ่งตำแหน่งที่ sheet แตก

ตัวเป็นหยด (primary breakup) เรียบร้อยแล้ว จะอยู่ห่างจากปลายหัวฉีดไม่ถึง 10 mm จากนั้น จึงได้เริ่มแตกตัวต่อจากหยดใหญ่เป็นหยดเล็ก อย่างไรก็ตามที่ระยะ $z = 10$ mm ห่างจากหัวฉีด พบว่าสเปรย์มีหน้าตัดที่เล็กเกินไปสำหรับการใช้เทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุด ด้วยแสงเลเซอร์ขนาด 10 mm ของ Malvern Spraytec ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้เลือกวัดที่ ระยะ $z = 30$ mm ห่างจากหัวฉีด PLP 2.5 GPH โดยใช้ความดันฉีดสเปรย์เท่ากับ 10 bar ในการทดสอบ



ก) $\Delta P = 1$ bar



ข) $\Delta P = 2$ bar



ค) $\Delta P = 4$ bar



ง) $\Delta P = 7$ bar



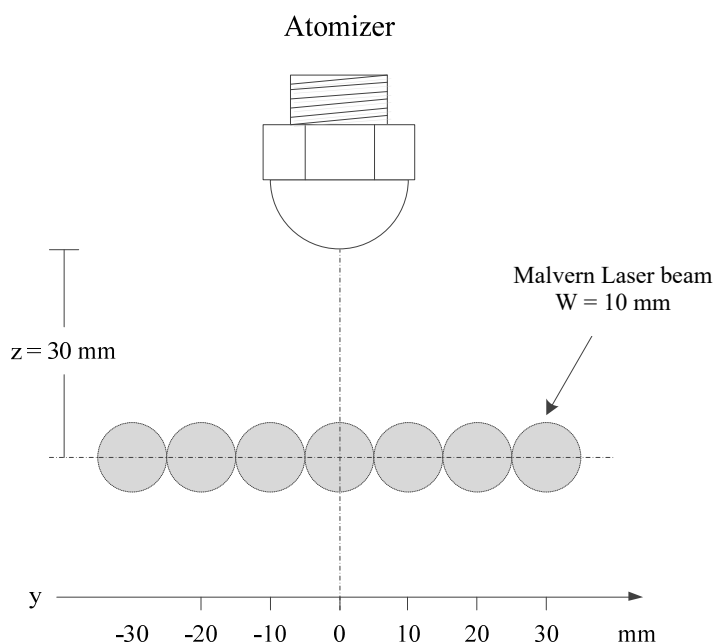
จ) $\Delta P = 10$ bar



ฉ) $\Delta P = 13$ bar

รูปที่ 3-6 การพัฒนาของสเปรย์จากหัวฉีด PLP 2.25 GPH

รูปที่ 3-7 แสดงแผนผังการวัดในแนววิถีด้วยแสงเลเซอร์ขนาด 10 mm ที่หน้าตัดสเปรย์ที่อยู่ห่างจากหัวฉีด 30 mm โดยทำการวัดตามแนวขวาง (y) เลื่อนจากจุดกึ่งกลางไปยังขอบของหน้าตัดสเปรย์ โดยจุดวัดแต่ละจุดห่างกันเท่ากับขนาดของเลเซอร์ 10 mm ข้อมูลที่วัดได้ในแนววิถีจะถูกนำมาคำนวณกลับให้ได้ข้อมูล ณ ตำแหน่งใดๆ โดยได้ทำแยกกันระหว่างด้านซ้ายและด้านขวา ความสมมาตรในแนวแกนของสเปรย์สามารถดูได้จากการเปรียบเทียบผลสองด้านนี้

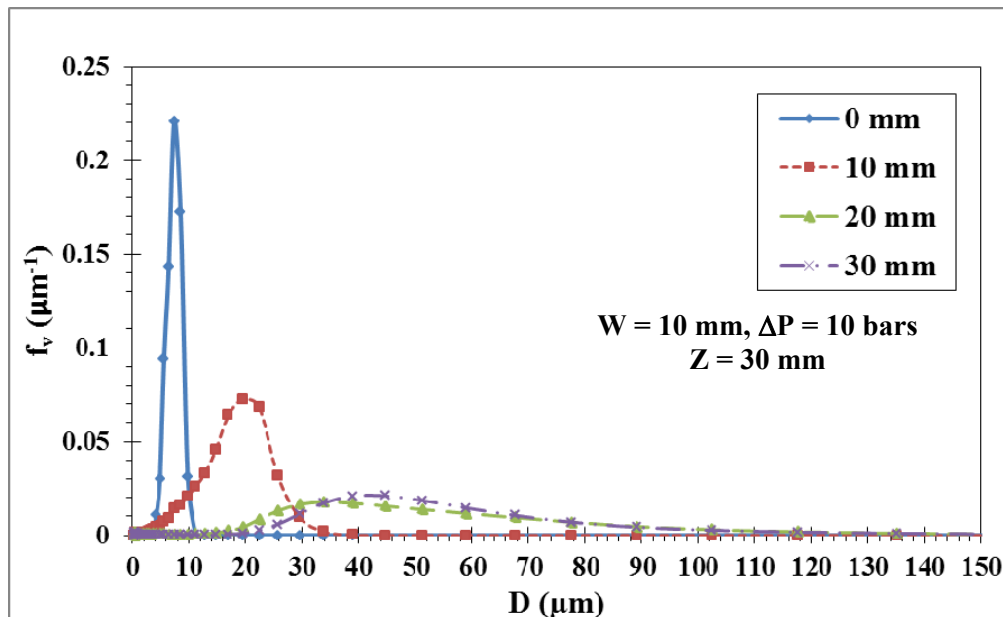


รูปที่ 3-7 แผนผังการวัดด้วยแสงเลเซอร์ 10 mm ที่ระยะ $z = 30$ mm

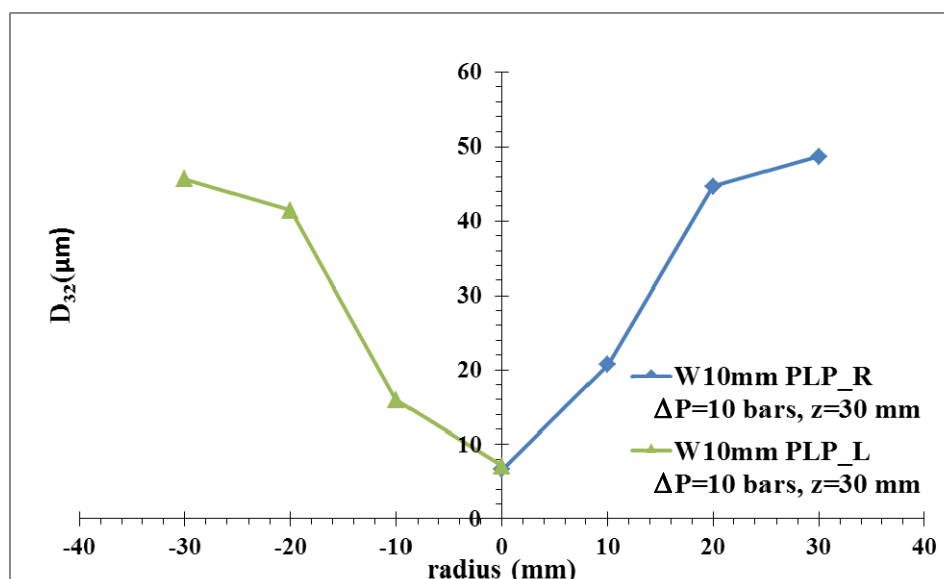
การกระจายตัวของขนาดหยดและค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์ ถูกคำนวณหาได้จากเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุด ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2

ในการหาการกระจายตัวของขนาดหยด ณ ตำแหน่งใดๆ ได้ใช้เทคนิคการคำนวณกลับกับตัวแปรที่เป็นค่าการกระจายตัวของความเข้มแสงที่กระเจิงในแนววิถี $\bar{I}_j(y_{i=1 \dots N})$ บนไดโอด j^{th} ของตัวตรวจจับ โดยที่ความเข้มแสงที่กระเจิงในแนววิถีที่วัดได้จากการสแกนจำนวน $N = 4$ ครั้งบนหน้าตัดของสเปรย์เดียวกันถูกนำมาใช้คำนวณกลับเพื่อหาค่าความเข้มแสงที่กระเจิง ณ ตำแหน่งใด ๆ ต่อหนึ่งหน่วยความยาว จากนั้นนำความเข้มแสงที่กระเจิง ณ ตำแหน่งใด ๆ ต่อหนึ่งหน่วยความยาวไปคำนวณหาการกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ (local volume-based drop-size distribution) ด้วยทฤษฎีของลอเรนซ์มี (Lorenz-Mie Theory) (สมการที่ (2.1) ในบทที่ 2) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมที่มากับเครื่องมือวัด Malvern Spraytec ช่วยคำนวณ โดยการนำเข้า (Import) ข้อมูล local ของแสงกระเจิงบนไดโอด 1-31 ได้ผลดังรูปที่ 3-8 โดยพบว่าตรงตำแหน่งตรงกลางของหน้าตัดสเปรย์ไม่เป็นกรวยกลวง และมีการกระจายตัวของขนาดหยดที่อยู่ในช่วงของหยดขนาดเล็กไม่เกิน 12 ไมครอน สเปรย์มีขนาดของหยดที่ใหญ่

มากขึ้นเมื่อเลื่อนตำแหน่งออกไปที่ขอบของหน้าตัดสเปรย์ ซึ่งสอดคล้องกับขนาดหยดเฉลี่ยแบบชอเทอร์ ฌ ตำแหน่งใด ๆ (local D_{32}) ในรูปที่ 3-9 โดยขนาดหยดเฉลี่ย D_{32} ด้านซ้ายและด้านขวาแสดงค่าน้อยที่สุดที่ตรงกลางของหน้าตัดสเปรย์และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเลื่อนออกไปยังขอบด้านนอก โดยมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันทั้งสองด้าน แสดงให้เห็นว่าสเปรย์มีความสมมาตรในแนวแกน ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับกรณีของสเปรย์หน้าตัดกรวยเต็มในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [19,20]



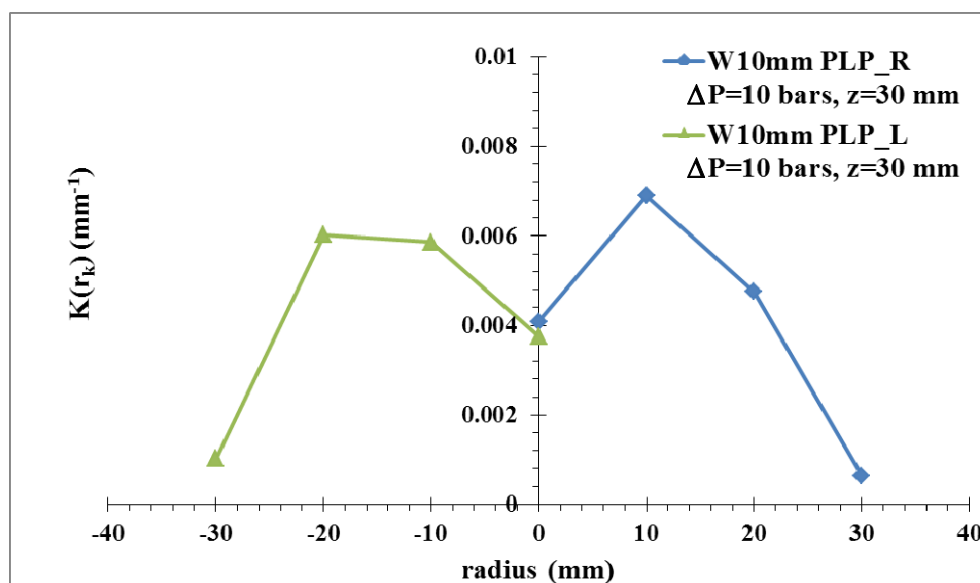
รูปที่ 3-8 การกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตร ฌ ตำแหน่งใด ๆ ของสเปรย์น้ำด้านซ้าย ($\Delta P = 10$ bar, $z = 30$ mm)



รูปที่ 3-9 ขนาดหยดเฉลี่ยชอเทอร์ ฌ ตำแหน่งใด ๆ (local D_{32}) ของสเปรย์น้ำด้านขวา (PLP_R) และด้านซ้าย (PLP_L) ($\Delta P = 10$ bar, $z = 30$ mm)

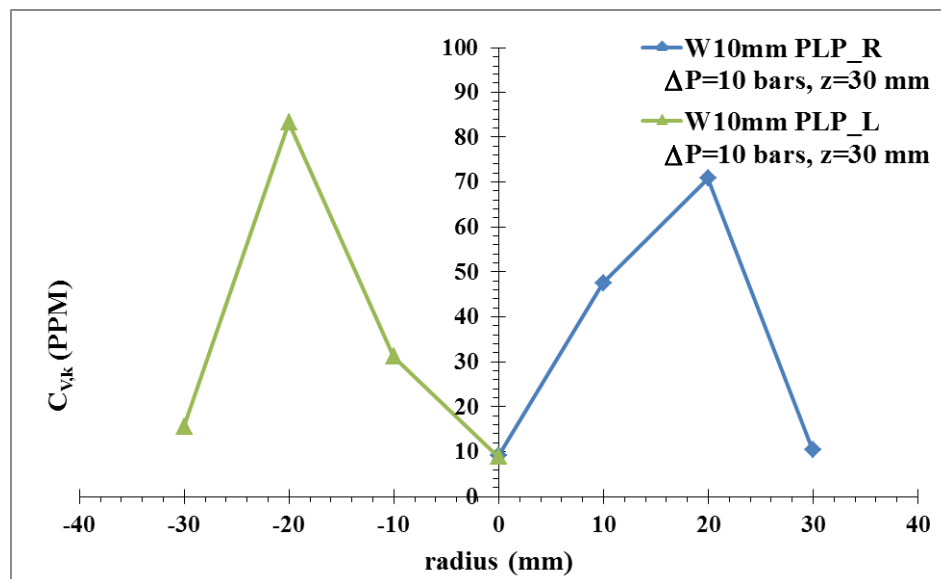
สำหรับค่าความเข้มข้น ณ ตำแหน่งใด ๆ หาได้จากการนำเทคนิคการคำนวณกลับมาใช้กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนในแนววิถี $\bar{K}_j(y_i)$ ที่มีความสัมพันธ์กับค่าการส่งผ่านแสงตามกฎของเบียร์แลมเบิร์ต จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ณ ตำแหน่งใด ๆ $K(r_k)$ ที่ได้จากเทคนิคการคำนวณกลับมาคำนวณหาค่าความเข้มข้น ณ ตำแหน่งใด ๆ ตามสมการ (2.17)

รูปที่ 3-10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ณ ตำแหน่งใด ๆ (local extinction coefficient, $K(r_k)$) โดยพบว่า $K(r_k)$ มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งตรงกลางของหน้าตัดสเปรย์ $K(r_k)$ มีค่าสูงสุดบริเวณระหว่างกึ่งกลางและขอบของหน้าตัดสเปรย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีหยดสเปรย์หนาแน่นในบริเวณนี้ ทั้งนี้เนื่องจากการแตกตัวแบบ conical sheet



รูปที่ 3-10 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ณ ตำแหน่งใด ๆ ของสเปรย์น้ำด้านขวา (PLP_R) และด้านซ้าย (PLP_L) ($\Delta P = 10$ bar, $z = 30$ mm)

จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ณ ตำแหน่งใด ๆ มาคำนวณค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ (local volume concentration, C_v) ได้ผลดังรูปที่ 3-11 โดยพบว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสเปรย์มีค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตรไม่เท่ากับศูนย์ เช่นเดียวกับค่า $K(r_k)$ แสดงว่ามีหยดของสเปรย์อยู่ในบริเวณนี้ แต่อย่างไรก็ตามค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตรนี้มีค่าน้อยมาก ค่าสูงสุดของค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตรอยู่ระหว่างกึ่งกลางและขอบของหน้าตัดสเปรย์ เนื่องจากการแตกตัวแบบ conical sheet จึงมีความเป็นไปได้ที่อาจมีกรวยกลวงอยู่เพียงแต่กรวยกลวงนั้นมีขนาดเล็กกว่าขนาดบริเวณตรงกลาง ($r_k = 4$) นี้



รูปที่ 3-11 แสดงค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำด้านขวา (PLP_R) และด้านซ้าย (PLP_L) ($\Delta P = 10$ bar, $z = 30$ mm)

จากผลการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดสำหรับสเปรย์หน้าตัดกรวยกลวงสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลที่ได้จากการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดของสเปรย์ทั้งด้านซ้ายและด้านขวามีค่าที่ใกล้เคียงสอดคล้องกัน สมมุติฐานที่กำหนดไว้ในอัลกอริธึมว่าสเปรย์มีความสมมาตรในแนวแกน จึงสามารถใช้ได้เช่นเดียวกับ กรณีของสเปรย์หน้าตัดกรวยเต็มในงานวิจัยก่อนหน้า

2. จากผลการทดลอง ที่หน้าตัดสเปรย์ห่างจากหัวฉีด $z = 30$ mm ไม่พบกรวยกลวง (hollow) หรือช่องว่างอากาศที่ตรงกลางของหน้าตัดสเปรย์ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจาก ขนาดของแสงเลเซอร์มีขนาดใหญ่กว่ากรวยกลวงบนหน้าตัดสเปรย์

จากผลที่ได้ จึงได้ทำการออกแบบการทดลองใหม่ โดยทำการลดขนาดของแสงเลเซอร์ให้มีขนาดเล็กลงกว่าเดิม โดยใช้อุปกรณ์ 3x optical beam expander เพื่อลดขนาดของแสงเลเซอร์ลงจาก 10 mm เป็น 3.33 mm โดยเบื้องต้นได้ทำการทดลองถ่ายภาพการส่องของแสงเลเซอร์ 3.33 mm ผ่านกึ่งกลางของหน้าตัดสเปรย์ที่ระยะ $z = 10$ mm ห่างจากหัวฉีด PL และ PLP (ขนาด 2.25 GPH) โดยใช้ความดันฉีด 3 ค่า คือ 7, 10 และ 13 bar พบว่าความเข้มข้นของแสงเลเซอร์ที่ส่องผ่านสเปรย์ในแนววิถีจะมีความเข้มแสง (แสงสีแดงที่กระเจิงเข้ากล้อง) มากที่บริเวณระหว่างกึ่งกลางและขอบของหน้าตัดสเปรย์ซึ่งเป็นบริเวณ downstream ของการแตกตัวของ conical sheet ขณะที่บริเวณตรงกลางมีความเข้มแสงน้อยมาก (ดังรูปที่ 3-12) แสดงว่าบริเวณตรงกลางนี้มีปริมาณหยดหรือความเข้มข้นของสเปรย์น้อยมาก นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มความดันมีแนวโน้มทำให้แสงกระเจิงบริเวณตรงกลางของหน้าตัดสเปรย์มีความเข้มน้อยลง

ผลดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากการไหลเข้าของอากาศจากภายนอกสเปรย์ (air entrainment) ที่ผลักให้หยดขนาดเล็กมากบางส่วนไหลเข้ามาบริเวณแกนกลางของ

หน้าตัดสเปรย์ โดยจะเห็นผลน้อยลงเมื่อความดันเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความเร็วของสเปรย์ที่สูงขึ้นในทิศ downstream ของการแตกตัว ทำให้หยดขนาดเล็กไม่ทันถูกผลึกเข้ามายังพื้นที่ตรงกลางของหน้าตัดสเปรย์ ณ ตำแหน่ง $z = 10$ mm อย่างไรก็ตามความเข้มแสงที่เห็นในบริเวณนี้มีปริมาณน้อยมาก ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นบริเวณของกรวยกลวงนั่นเอง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าของ C_v โดยทั่วไปถ้าสเปรย์มีค่า C_v น้อยมาก ๆ กล่าวคือ มีปริมาณหยดของเหลวใน measurement volume น้อยมาก แสงที่กระเจิงจากการเลี้ยวเบนของแสงบนไดโอด 1-31 จะมีค่าน้อยและอาจต่ำกว่าค่าขั้นต่ำที่เหมาะสมที่ตั้งไว้ของเครื่อง Malvern Spraytec ได้ ซึ่งในกรณีนี้เครื่อง Malvern Spraytec จะไม่คำนวณ $f_v(D)$ ออกมาให้ และแสดงค่า $C_v = 0$

จากรูปที่ 3-12 จะเห็นว่าบริเวณแกนกลางที่มีความเข้มข้นของหยดน้อยนี้มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเลเซอร์ใหม่ที่มีขนาด 3.33 mm ซึ่งน่าจะทำให้สามารถพบกรวยกลวงจากการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดเพื่อหาค่า C_v ได้ โดยแสดงค่า $C_v = 0$ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางหน้าตัดของสเปรย์ ดังนั้นการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้แสงเลเซอร์ขนาด 3.33 mm ที่ได้จากการลดขนาดด้วย 3x optical beam expander แทนที่ขนาดดั้งเดิมของเครื่องมือวัด Malvern Spraytec ที่มีขนาด 10 mm

3.3 รายละเอียดการทดลองของโครงการวิจัย

3.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมและศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์น้ำเบื้องต้น

งานวิจัยในส่วนแรกมีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ 1) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมของเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดเพื่อหาความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ โดยใช้หัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวง และ 2) เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์น้ำที่ได้จากหัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวง โดยในส่วนของการตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมจะกระทำการศึกษาคูณลักษณะของสเปรย์น้ำที่ได้จากหัวฉีดดังกล่าว

ในงานวิจัยส่วนนี้ใช้หัวฉีด 2 ชนิด คือ PLP และ PL ที่มีขนาด 2.25 GPH ในการทดลองด้วย Malvern Spraytec และการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดเพื่อหาการกระจายตัวของขนาดหยดและความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ จะมีขั้นตอนเหมือนกับที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้า เพียงแต่ใช้เลเซอร์ที่ใช้มีขนาดเล็กลง (3.33 mm) รวมถึงตำแหน่งในการวัดที่เปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 3-13 คือ ทำการวัดบนหน้าตัดสเปรย์ห่างจากหัวฉีด $z = 10, 20, 30$ และ 40 mm โดยสแกนแสงเลเซอร์จากกึ่งกลางของหน้าตัดสเปรย์มายังขอบครึ่งละ 3.33 mm ซึ่งจะทำให้การวัดเพียงด้านเดียวของหน้าตัดสเปรย์เนื่องจากสเปรย์มีความสมมาตรตามผลการวัดที่ได้ก่อนหน้านี้ ความดันฉีดที่ใช้ คือ 7, 10 และ 13 bar โดยมีเงื่อนไขการทดลองตามตารางที่ 3-3



ก) PLP 2.25 GPH, $\Delta P = 7$ bar



ข) PL 2.25 GPH, $\Delta P = 7$ bar



ค) PLP 2.25 GPH, $\Delta P = 10$ bar



ง) PL 2.25 GPH, $\Delta P = 10$ bar

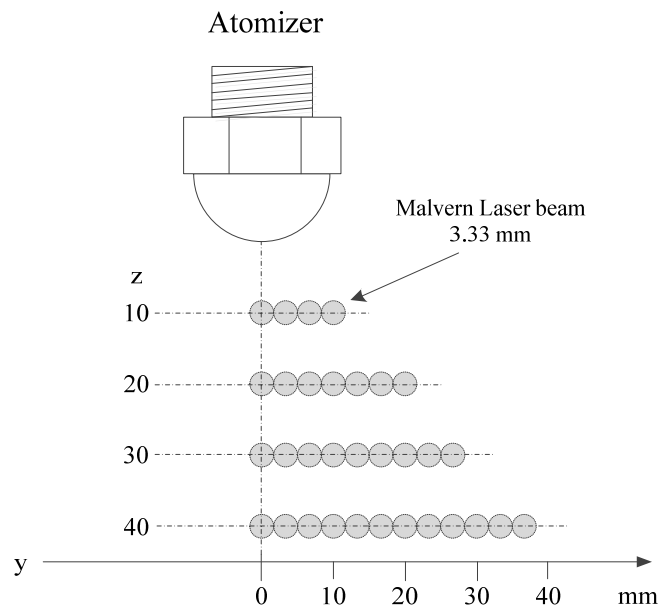


จ) PLP 2.25 GPH, $\Delta P = 13$ bar



ฉ) PL 2.25 GPH, $\Delta P = 13$ bar

รูปที่ 3-12 ภาพการส่องแสงเลเซอร์ผ่านกึ่งกลางสเปรย์ (หัวฉีด PLP และ PL, $z = 10$ mm)



รูปที่ 3-13 แผนผังการวัดด้วย Malvern Spraytec ที่ระยะ $z = 10, 20, 30$ และ 40 mm

ตารางที่ 3-3 เงื่อนไขในการทดลองของงานส่วนแรก

ของเหลว ทดสอบ	หัวฉีด	ΔP (bar)	z (mm)	y (mm)
น้ำ	PL 2.25 GPH	7 และ 13	10	0, 3.33, 6.66, 9.99
		10	10	0, 3.33, 6.66, 9.99
			20	0, 3.33, 6.66, 9.99, 13.32, 16.65, 19.98
			30	0, 3.33, 6.66, 9.99, 13.32, 16.65, 19.98, 23.31, 26.64
			40	0, 3.33, 6.66, 9.99, 13.32, 16.65, 19.98, 23.31, 26.64, 29.97, 33.3, 36.63
	PLP 2.25 GPH	7 และ 13	10	0, 3.33, 6.66, 9.99
		10	10	0, 3.33, 6.66, 9.99
			20	0, 3.33, 6.66, 9.99, 13.32, 16.65, 19.98
			30	0, 3.33, 6.66, 9.99, 13.32, 16.65, 19.98, 23.31, 26.64
			40	0, 3.33, 6.66, 9.99, 13.32, 16.65, 19.98, 23.31, 26.64, 29.97, 33.3, 36.63

3.3.2 การศึกษาคูณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลเพื่อเปรียบเทียบกับสเปรย์ของดีเซล

งานวิจัยในส่วนที่สองมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคูณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลที่ได้จากหัวฉีดความดันหมวนแบบหน้าตัดกรวยกลวงและทำการเปรียบเทียบกับสเปรย์ของดีเซล รวมถึงศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มอุณหภูมิของไบโอดีเซล

ในการทดลองส่วนนี้ ใช้น้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลทดสอบกับหัวฉีดความดันหมุนวนประเภทกรวยกลวงชนิดเดียว คือ PLP ขนาด 2.25 GPH โดยทำการวัดที่ความดันฉีด 7, 10 และ 13 bar โดยที่ความดันฉีด 7 และ 13 bar จะทำการวัดบนหน้าตัดสเปร์ย์ที่ $z = 10$ mm สำหรับความดันฉีด 10 bar จะทำการวัดที่ระยะ $z = 10, 20$, และ 30 mm อุณหภูมิน้ำมันขณะทดลองจะถูกควบคุมด้วยชุดทำความร้อน โดยไบโอดีเซลจะถูกทดลองที่อุณหภูมิ 30°C และ 55°C ขณะที่น้ำมันดีเซลจะวัดที่อุณหภูมิ 30°C ดูตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 เงื่อนไขในการทดลองของงานส่วนที่สอง

ของเหลว ทดสอบ	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	หัวฉีด	ΔP (bar)	z (mm)	y (mm)
ไบโอดีเซล	30 และ 55	PLP 2.25 GPH	10	10	0, 3.33, 6.66, 9.99
				20	0, 3.33, 6.66, 9.99, 13.32, 16.65
				30	0, 3.33, 6.66, 9.99, 13.32, 16.65, 19.98, 23.31
			7 และ 13	10	0, 3.33, 6.66, 9.99
ดีเซล	30	PLP 2.25 GPH	10	10	0, 3.33, 6.66, 9.99
				20	0, 3.33, 6.66, 9.99, 13.32, 16.65
				30	0, 3.33, 6.66, 9.99, 13.32, 16.65, 19.98, 23.31
			7 และ 13	10	0, 3.33, 6.66, 9.99

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานของโครงการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานของโครงการวิจัย ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก คือ ผลการตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมและการศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์น้ำเบื้องต้น จากหัวฉีดความดันหมุนวนประเภทหน้าตัดกรวยกลวง และผลการศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลเพื่อเปรียบเทียบกับสเปรย์ของดีเซลจากหัวฉีดดังกล่าว

4.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมและการศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์น้ำเบื้องต้น

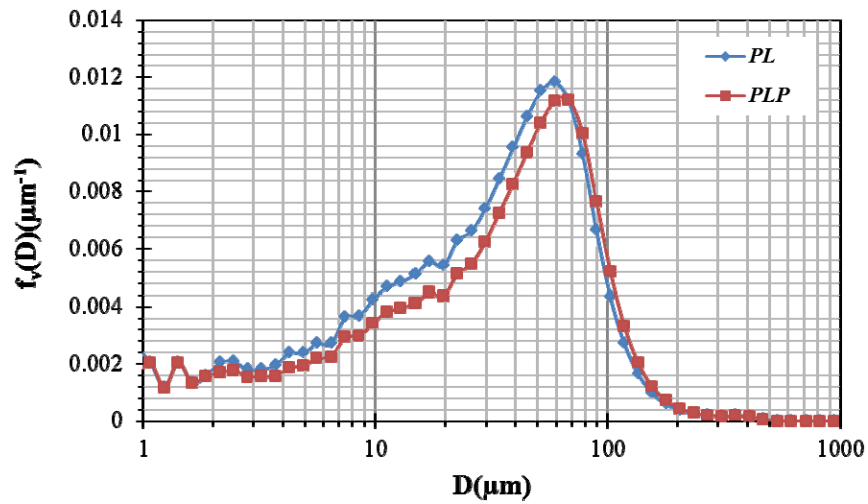
งานส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมของเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดเพื่อหาความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ และเพื่อศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์น้ำที่ได้จากหัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวง โดยในส่วนของ การตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมจะกระทำผ่านการศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์น้ำที่ได้จากหัวฉีดดังกล่าว

ในการศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์น้ำของหัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวงจะประกอบด้วยผลกระทบของ ประเภทหัวฉีด PLP และ PL (nozzle geometry) ความดันฉีด (ΔP) และระยะห่างจากหัวฉีด (z) โดยพิจารณาคุณลักษณะดังนี้ 1) การกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตรในแนววิถี 2) การกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ จนถึง 3) ความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ

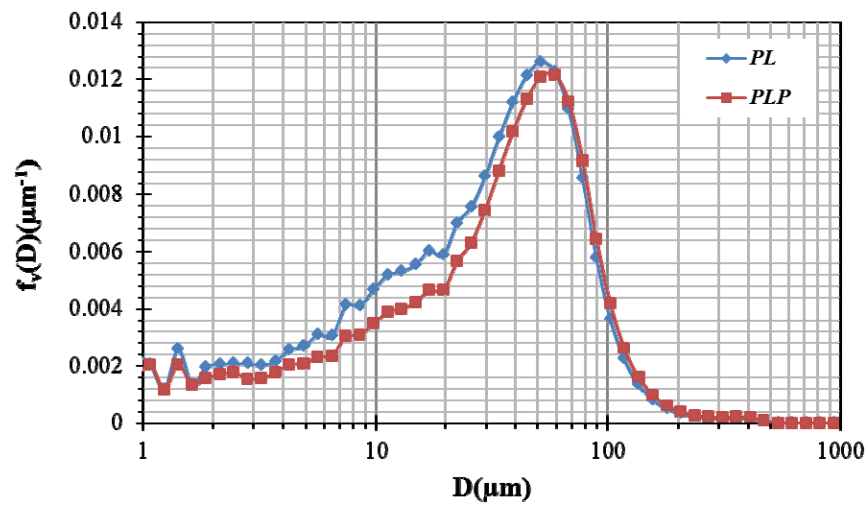
4.1.1 การกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตรในแนววิถี

จากผลการวัดในแนววิถีเบื้องต้น (path measurement) ด้วย Malvern Spraytec จะได้ การกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตร $f_v(D)$ ของหัวฉีดสองชนิด แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4-1 เป็นการวัดที่ความดัน 7, 10 และ 13 bar ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของสเปรย์ ($y = 0$ mm) ห่างจากหัวฉีด $z = 10$ mm แกนนอนของกราฟถูกแสดงในรูปของ log scale เพื่อให้สามารถเห็นความแตกต่างกันของเส้นโค้ง $f_v(D)$ ได้ชัดเจนขึ้น โดยเส้นโค้ง $f_v(D)$ ของหัวฉีด PLP จะเลื่อนไปทางขวาของหัวฉีด PL เล็กน้อย แสดงว่ามีขนาดหยดของสเปรย์หยาบกว่าเล็กน้อย ความแตกต่างนี้เกิดจาก nozzle geometry ที่แตกต่างกัน

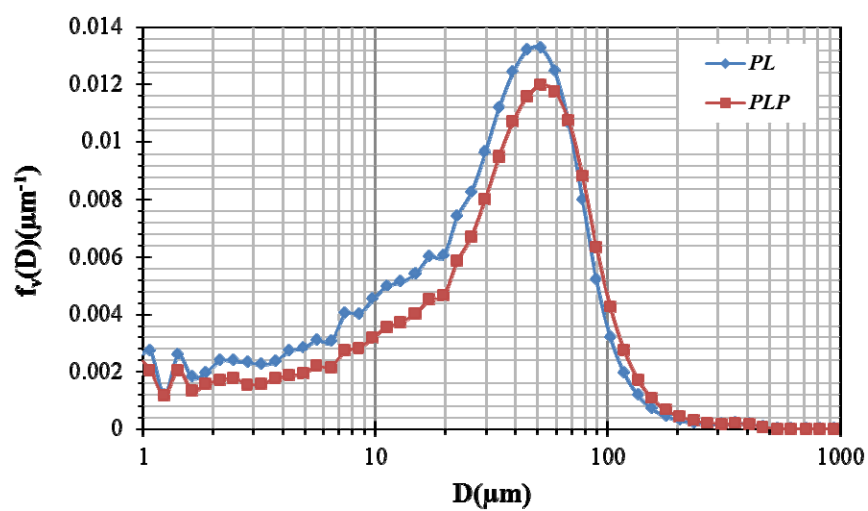
เมื่อความดันฉีดเพิ่มขึ้น พบว่าเส้นโค้ง $f_v(D)$ ของสเปรย์ทั้งสองหัวฉีดเลื่อนไปทางด้านซ้ายมือเล็กน้อยโดยสังเกตได้ง่ายจากจุดสูงสุด (peak) ของเส้นโค้ง $f_v(D)$ ที่เลื่อนไปทางซ้ายหมายความว่าสเปรย์มีความละเอียดมากขึ้น



ก) $\Delta P = 7$ bar



ข) $\Delta P = 10$ bar



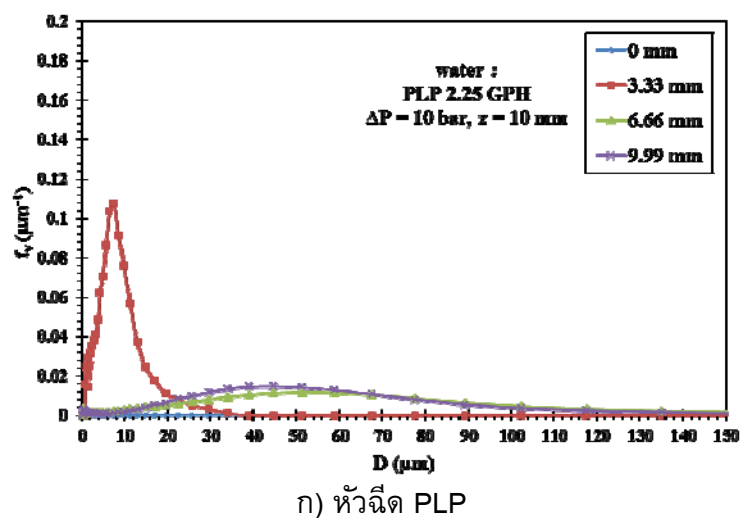
ค) $\Delta P = 13$ bar

รูปที่ 4-1 การกระจายตัวของขนาดหยดในแนววิถีของสเปรย์น้ำที่ความดันฉีด 3 ค่า
($y = 0$ mm และ $z = 10$ mm)

4.1.2 การกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ

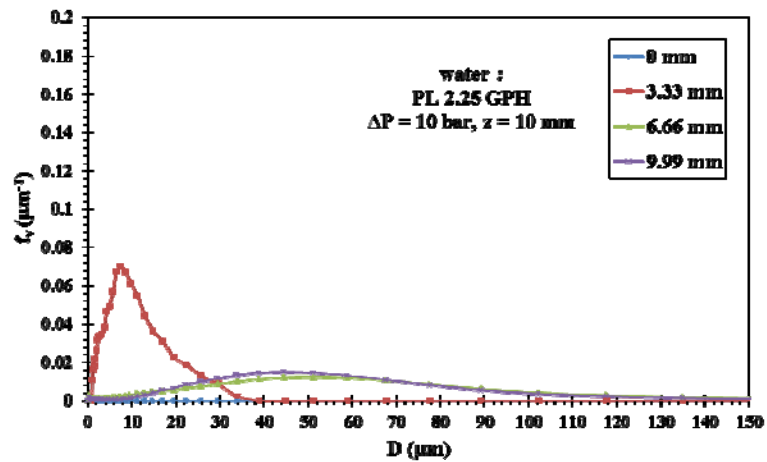
หลังจากการวัดในแนววิถีตามรูปที่ 3-13 และนำข้อมูลของแสงที่กระเจิงบนไดโอด 1-31 มาทำการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดเพื่อให้ได้ข้อมูล ณ ตำแหน่งใดๆ แล้ว การกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ สามารถคำนวณจากข้อมูลแสงดังกล่าวด้วย Mie theory

รูปที่ 4-2, 4-3, 4-4 และ 4-5 แสดงการกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ ของหัวฉีด PLP และ PL ที่ความดันฉีด $\Delta P = 10$ bar บนหน้าตัดสเปรย์ $z = 10, 20, 30$ และ 40 mm ห่างจากหัวฉีด ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่า หยดขนาดเล็กจะอยู่บริเวณตรงกลางหน้าตัดของสเปรย์ เมื่อเลื่อนตำแหน่งออกไปตามแนวรัศมีจะพบหยดที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับคุณลักษณะของสเปรย์ที่ได้จากหัวฉีดความดันหมุนวนประเภทหน้าตัดกรวยเต็ม (type R) ในงานวิจัยก่อนหน้า [19,20] สังเกตว่า บริเวณกึ่งกลางหน้าตัดของสเปรย์ที่ตำแหน่ง $r_k = 0$ mm ในเกือบทุกของหน้าตัดสเปรย์จากหัวฉีด PLP และ PL ที่ความดันฉีด 10 bar (ยกเว้นที่ระยะ $z = 40$ mm กรณีหัวฉีด PLP) ได้แสดงค่าการกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ เป็นศูนย์ตลอดทุกค่า D (แกนนอน) นั้นหมายความว่า บริเวณกึ่งกลางนี้ไม่มีหยดของสเปรย์อยู่และเป็นพื้นที่ของกรวยกลวงนั่นเอง ซึ่งจะถูกอธิบายด้วยผลของค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ อีกทีหนึ่ง



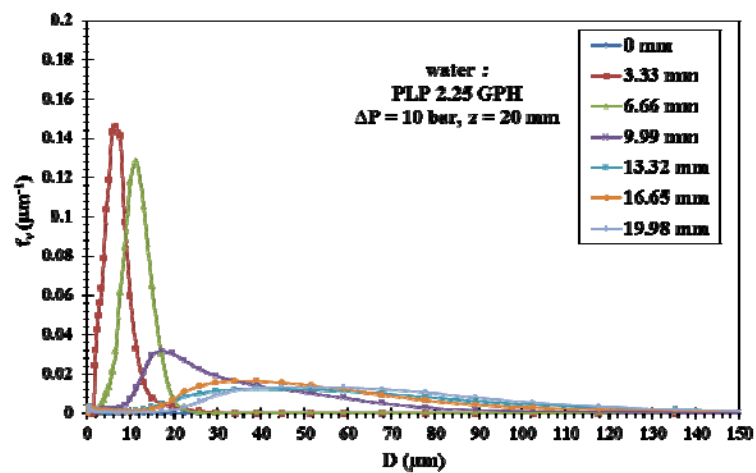
รูปที่ 4-2 การกระจายตัวของขนาดหยด ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำของหัวฉีดสองชนิด

($\Delta P = 10$ bar, $z = 10$ mm)

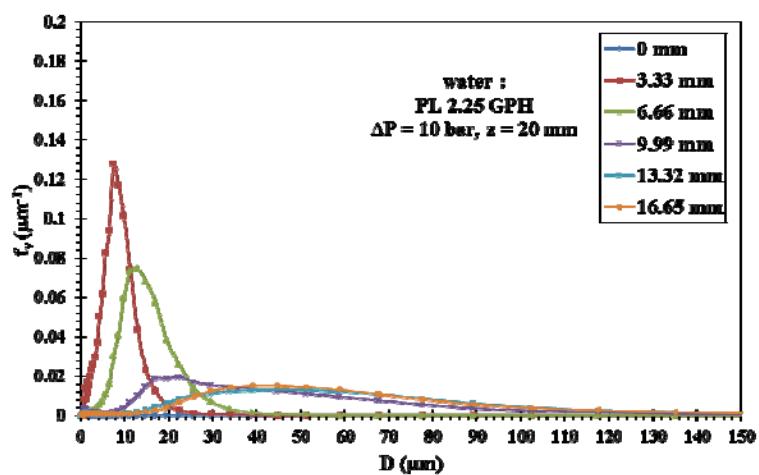


ข) หัวฉีด PL

รูปที่ 4-2 การกระจายตัวของขนาดหยด ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำของหัวฉีดสองชนิด
($\Delta P = 10 \text{ bar}$, $z = 10 \text{ mm}$) (ต่อ)

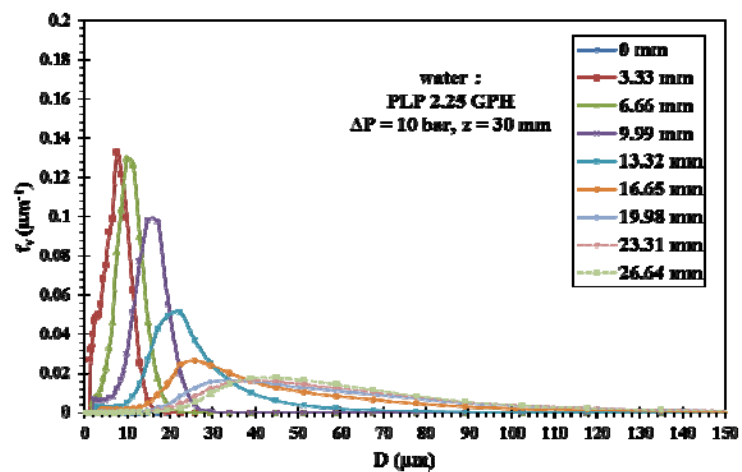


ก) หัวฉีด PLP

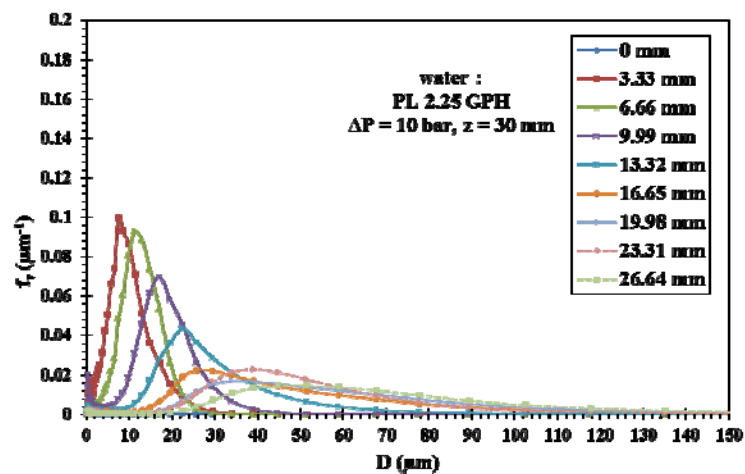


ข) หัวฉีด PL

รูปที่ 4-3 การกระจายตัวของขนาดหยด ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำของหัวฉีดสองชนิด
($\Delta P = 10 \text{ bar}$, $z = 20 \text{ mm}$)

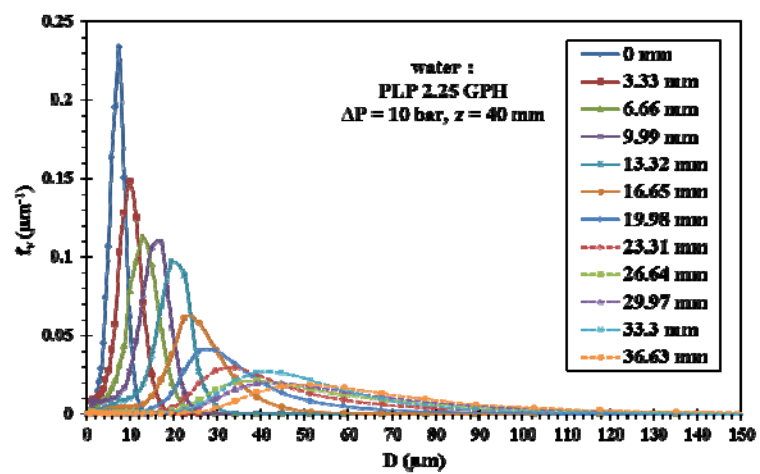


ก) หัวฉีด PLP



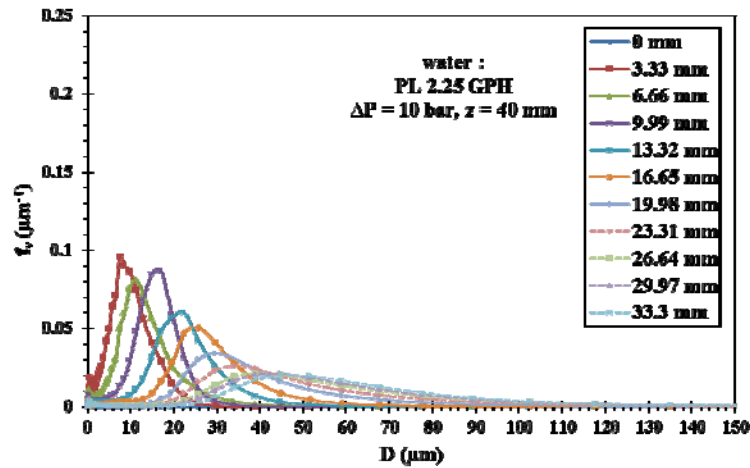
ข) หัวฉีด PL

รูปที่ 4-4 การกระจายตัวของขนาดหยด ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำของหัวฉีดสองชนิด
($\Delta P = 10 \text{ bar}$, $z = 30 \text{ mm}$)



ก) หัวฉีด PLP

รูปที่ 4-5 การกระจายตัวของขนาดหยด ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำของหัวฉีดสองชนิด
($\Delta P = 10 \text{ bar}$, $z = 40 \text{ mm}$)

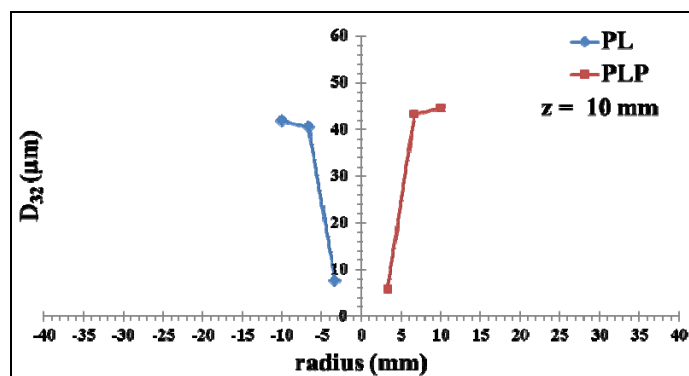


ข) หัวฉีด PL

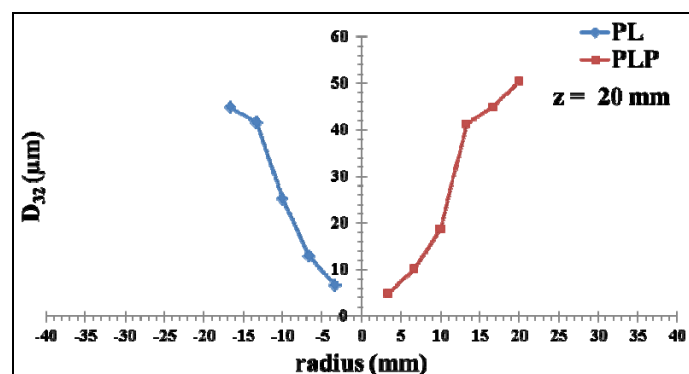
รูปที่ 4-5 การกระจายตัวของขนาดหยด ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำของหัวฉีดสองชนิด
($\Delta P = 10$ bar, $z = 40$ mm) (ต่อ)

รูปที่ 4-6 แสดงขนาดหยดเฉลี่ย D_{32} (Sauter mean diameter) ของสเปรย์ที่มีการกระจายตัวของขนาดหยด $f_v(D)$ ตามรูปที่ 4-2 ถึง 4-5 โดยได้แสดงผลของหัวฉีด PL อยู่ด้านซ้ายและผลของหัวฉีด PLP อยู่ด้านขวา ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ขนาดหยดเฉลี่ย D_{32} ณ ตำแหน่งใดๆ ของสองหัวฉีดมีความใกล้เคียงกัน โดยหัวฉีด PLP มีแนวโน้มที่มีขนาดของหยดเฉลี่ยใหญ่กว่าบริเวณขอบของสเปรย์ และมีแนวโน้มที่จะมีหยดขนาดเล็กกว่าที่บริเวณแกนกลางด้านในหน้าตัดสเปรย์ โดยปกติข้อมูล D_{32} ณ ตำแหน่งใดๆ เพียงข้อมูลเดียวไม่สามารถนำมาอธิบายได้ว่าสเปรย์ใดมีความละเอียดมากกว่ากัน จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ ด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลของ D_{32} บริเวณของด้านนอกของหน้าตัดสเปรย์ของหัวฉีด PLP ที่มีแนวโน้มสูงกว่าบริเวณตรงกลางด้านในของหน้าตัด น่าจะมีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยในแนววิถีมากกว่า จึงจะได้ผลที่สอดคล้องกับผลการวัดในแนววิถี (ดูหัวข้อ 4.1.1) สังเกตว่า D_{32} ณ ตำแหน่ง $r_k = 0$ mm มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ในกรณีหัวฉีด PLP เพียงกรณีเดียวในรูปที่ 4-6 ง) ทั้งนี้เนื่องจากการวัดด้วย Malvern Spraytec ที่ตำแหน่งนี้นั้นสามารถตรวจจับการกระเจิงของแสงในมุมเล็กๆ ไปทางด้านหน้า (small-angle forward light scattering) จากละอองสเปรย์ได้เกินค่าขั้นต่ำที่ตั้งไว้ จึงสามารถคำนวณผลการกระจายตัวของขนาดหยด $f_v(D)$ และ D_{32} ได้ แสดงว่าบริเวณนี้ น่าจะมีความเข้มข้นเชิงปริมาตรของสเปรย์ไม่เท่ากับศูนย์

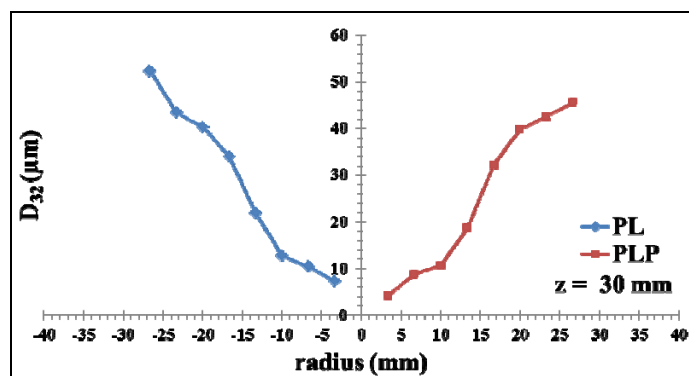
เมื่อพิจารณาระยะห่างจากหัวฉีด (z) ที่แตกต่างกัน พบว่าโดยทั่วไปหน้าตัดสเปรย์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้มี pathlength ของการวัดยาวขึ้นเมื่อ z มากขึ้น ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า D_{32} มีขนาดใหญ่ขึ้นตามระยะ z หรือ downstream ทั้งนี้เนื่องมาจากการลดลงของโมเมนตัมของหยดขนาดใหญ่ที่ทำให้หยดติดกันช้ากว่าหยดขนาดเล็ก จึงทำให้มีสัดส่วนของหยดขนาดใหญ่ใน measurement volume มากขึ้น ตาม downstream โดยผลที่ได้นี้สอดคล้องกับหัวฉีดความดันหมุนวนที่มีหน้าตัดกรวยเต็ม (type R) ในงานวิจัยก่อนหน้า [19, 20]



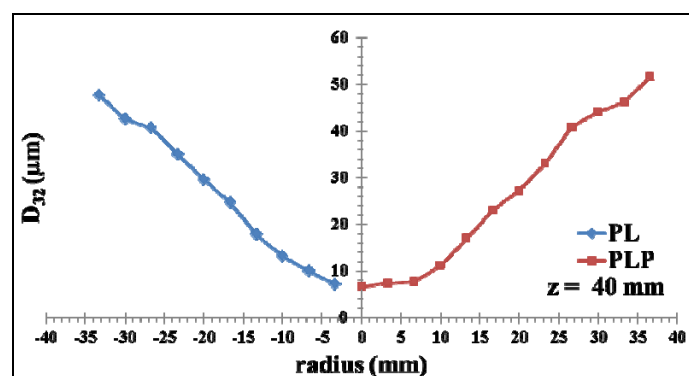
ก) $z = 10$ mm



ข) $z = 20$ mm



ค) $z = 30$ mm



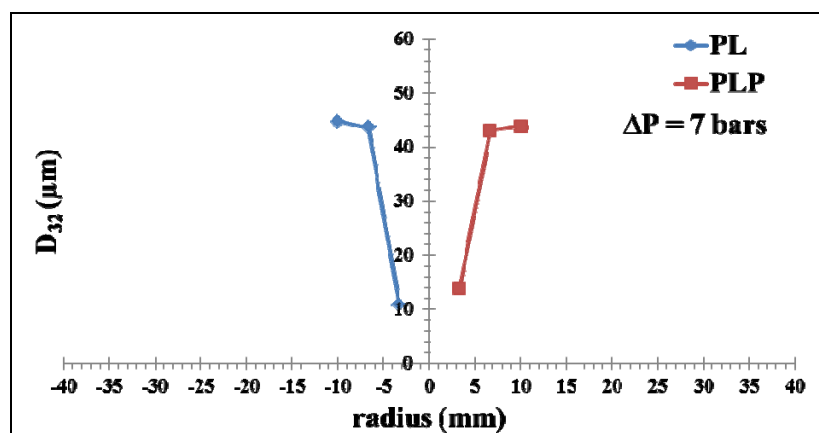
ง) $z = 40$ mm

รูปที่ 4-6 D_{32} ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำจากหัวฉีดสองชนิดที่ระยะ z ต่างๆ

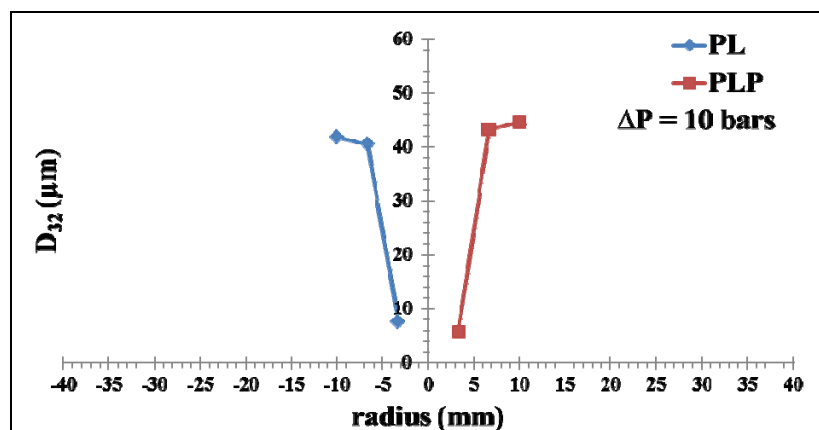
($\Delta P = 10$ bar)

นอกจากนี้เมื่อระยะ z เพิ่มขึ้น พบว่ามีหยดขนาดเล็กปรากฏ ณ ตำแหน่ง $r_k = 0$ mm บนหน้าตัดสเปรย์ของหัวฉีด PLP ที่ $z = 40$ mm ดังในรูปที่ 4-6 ง) สาเหตุเนื่องมาจาก air entrainment ผลักหยดขนาดเล็กมากเข้ามาบริเวณกึ่งกลางของสเปรย์ ปรากฏการณ์นี้ไม่พบในกรณีของหัวฉีด PL ในเงื่อนไขทดสอบนี้ เนื่องจาก PL มีกรวยกลวงที่มีขนาดใหญ่กว่า (ดูรูปที่ 3-2) จึงทำให้ยังไม่พบหยดที่ถูกผลักเข้ามามากพอที่จะตรวจวัดเจอ

รูปที่ 4-7 แสดง D_{32} ณ ตำแหน่งใดๆ บนหน้าตัดสเปรย์ห่างจากหัวฉีด $z = 10$ mm ที่ความดันฉีดค่าต่างๆ โดยพบว่าไม่มีหยดสเปรย์ที่ตำแหน่ง $r_k = 0$ mm ทุกความดันฉีด 7, 10 และ 13 bar ของทั้งสองหัวฉีด สำหรับหัวฉีด PLP ที่ความดันฉีด 13 bar พบว่าไม่มีหยดสเปรย์ที่ตำแหน่ง $r_k = 3.33$ mm ด้วย เมื่อความดันฉีดเพิ่มขึ้น ในภาพรวมพบว่า D_{32} มีแนวโน้มเล็กลง

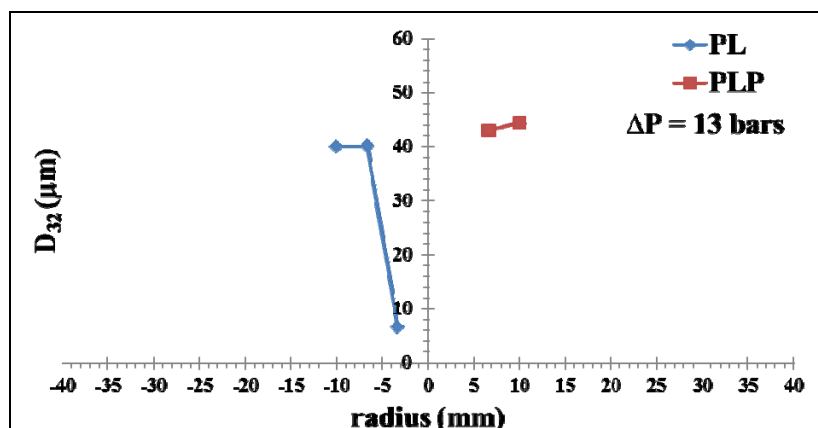


ก) $\Delta P = 7$ bar



ข) $\Delta P = 10$ bar

รูปที่ 4-7 D_{32} ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำจากหัวฉีดสองชนิดที่ความดันฉีดต่างๆ ($z = 10$ mm)



ค) $\Delta P = 13$ bar

รูปที่ 4-7 D_{32} ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำจากหัวฉีดสองชนิดที่ความดันฉีดต่างๆ
($z = 10$ mm) (ต่อ)

ในกรณีที่หัวฉีด PLP ไม่ได้แสดงการมีอยู่ของหยดสเปรย์ ที่ระยะ $r_k = 3.33$ mm ในขณะที่หัวฉีด PL พบหยดสเปรย์นั้น ดูเหมือนขัดแย้งกับผลที่ได้ในรูปที่ 4-6 และลักษณะของหน้าตัดสเปรย์แบบกรวยกลวงในรูปที่ 3-2 ผลตรงกันข้ามที่พบนี้สามารถตั้งสมมุติฐานที่เป็นไปได้ร่วมกัน 2 ข้อ คือ (1) เมื่อความดันฉีดเพิ่มขึ้น อาจจะทำให้การแตกตัวของ sheet ที่มีความเร็วสูงขึ้นนี้ ยังไม่ทันกระจายตัวดีในตำแหน่งหน้าตัดสเปรย์ $z = 10$ mm (2) กรณีของ PLP มีสัดส่วนของขนาดหยดใหญ่มากกว่าหรือมีสัดส่วนของขนาดหยดเล็กน้อยกว่า (รูปที่ 4-1) จึงทำให้การผลึกหยดสเปรย์จากอากาศภายนอก (air entrainment) มีผลในกรณีของหัวฉีด PLP น้อยกว่ากรณีของหัวฉีด PL เนื่องจากหยดขนาดใหญ่ที่มีโมเมนตัมสูงสามารถเอาชนะแรงต้านของอากาศได้ดีกว่าหยดขนาดเล็กที่หมดแรงก่อนเมื่อเจอแรงต้านอากาศ ดังนั้นหยดขนาดเล็กกว่าจึงถูกอากาศภายนอกผลึกเข้าสู่แกนกลางของสเปรย์ได้ง่ายกว่า

4.1.3 ความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ

ในการหาความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ หาได้จากค่า $K(r_k)$ และ D_{32} ณ ตำแหน่งใดๆ โดยใช้สมการที่ (2.17) โดยค่า $K(r_k)$ ณ ตำแหน่งใดๆ ได้จากเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดที่อธิบายไว้ในบทที่ 2

รูปที่ 4-8 แสดง $K(r_k)$ ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำจากหัวฉีดสองชนิดที่ระยะ z ต่างๆ ที่ ความดันฉีด 10 bar ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะของหัวฉีดความดันหมุนวนที่มีการแตกตัวแบบ conical sheet โดย $K(r_k)$ มีค่าน้อยมากที่ตำแหน่งกึ่งกลางหน้าตัดสเปรย์ $r_k = 0$ mm โดยเฉพาะที่หน้าตัดสเปรย์ที่ $z = 10$ mm $K(r_k)$ มีค่าเกือบเท่ากับศูนย์ เมื่อพิจารณาตามแนวรัศมี $K(r_k)$ มีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งระหว่างกึ่งกลางและขอบของหน้าตัดสเปรย์ ซึ่งเป็น downstream ของการแตกตัวของ conical sheet จากนั้นมีค่าลดลงจนถึงขอบของสเปรย์

ค่า $K(r_k)$ ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์หน้าตัดกรวยกลวงนี้แตกต่างจากสเปรย์หน้าตัดกรวยเต็มที่พบในงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยพบว่าค่า $K(r_k)$ มีค่าสูงสุดที่กึ่งกลางหน้าตัดสเปรย์ และ

ค่อยๆ มีค่าลดลงจนมีค่าน้อยที่สุดที่ขอบของสเปรย์ [20] โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้เป็นการวัดคุณลักษณะของสเปรย์หน้าตัดกรวยเติมด้วยเลเซอร์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm ที่หน้าตัดสเปรย์ห่างจากหัวฉีด $z = 30, 40$ และ 50 mm

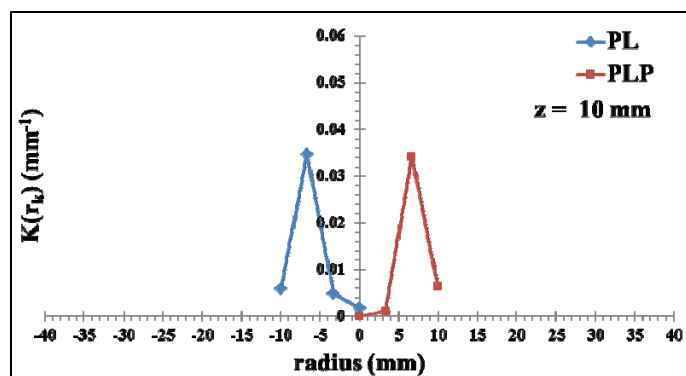
รูปที่ 4-9 แสดงค่า $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งใดๆ ที่คำนวณได้จากค่า $K(r_k)$ และ D_{32} ที่ได้ก่อนหน้านี้ พบว่า $C_{v,k}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางหน้าตัด ($r_k = 0$ mm) ทุกกรณี ยกเว้นกรณีของหัวฉีด PLP ที่ระยะ $z = 40$ mm เท่านั้น เมื่อพิจารณาตามแนวรัศมีพบว่าค่าของ $C_{v,k}$ มีค่าเพิ่มขึ้นตามแนวรัศมีจนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งระหว่างกึ่งกลางและขอบของหน้าตัดสเปรย์ จากนั้นจึงเริ่มมีค่าลดลงจนถึงขอบของหน้าตัดสเปรย์ ในลักษณะเดียวกับค่า $K(r_k)$

เมื่อเปรียบเทียบค่า $C_{v,k}$ ที่ได้นี้กับของสเปรย์หน้าตัดกรวยเติมในงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่ามีรูปแบบคล้ายคลึงกันซึ่งเป็นคุณลักษณะของหัวฉีดความดันหมุนวน เพียงแต่ไม่พบค่า $C_{v,k}$ เท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางในกรณีของสเปรย์หน้าตัดกรวยเติม

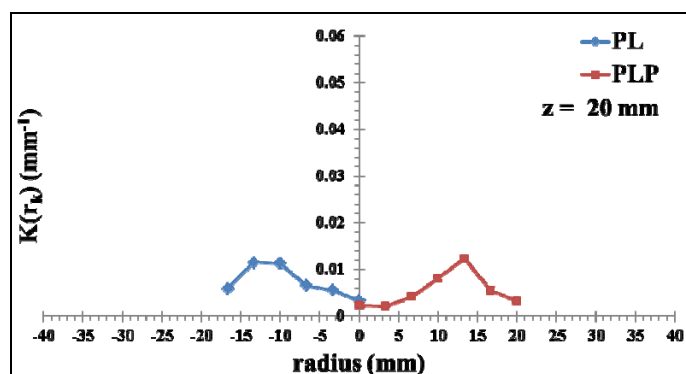
เมื่อระยะ z เพิ่มขึ้น ค่า $K(r_k)$ และ $C_{v,k}$ มีลักษณะที่กระจายแบนราบมากขึ้น โดยมีแนวโน้มลดลงตาม downstream เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของสเปรย์มีขนาดใหญ่ขึ้น ยกเว้นที่กึ่งกลางสเปรย์ที่ค่า $K(r_k)$ และ $C_{v,k}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจาก air entrainment ที่ผลักหยดขนาดเล็กมากเข้ามายังกึ่งกลางสเปรย์ที่ downstream มากขึ้น จนปรากฏค่า $C_{v,k}$ ไม่เท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสเปรย์ ($r_k = 0$ mm) ในกรณีของหัวฉีด PLP ที่ระยะ $z = 40$ mm

เมื่อความดันฉีดเพิ่มขึ้นจาก 7 bar ถึง 13 bar พบว่าค่า $K(r_k)$ และ $C_{v,k}$ มีค่าเพิ่มขึ้นในบริเวณที่เป็น downstream ของการแตกตัวของ conical sheet ขณะที่ตำแหน่งอื่นมีแนวโน้มลดลง ข้อมูลนี้เป็นเพียงข้อมูลที่ระยะ $z = 10$ mm เท่านั้น ซึ่งมีตำแหน่งในแนวรัศมีน้อยเกินไป ($r_k, k = 1, 2, 3$ และ 4) ไม่สามารถเห็นผลกระทบของความดันฉีด (ΔP) ต่อ pattern ของ $C_{v,k}$ ตามแนวรัศมีได้ อย่างไรก็ตาม จากผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ [19, 20] ของหัวฉีดความดันหมุนวน แม้จะเป็นประเภทหน้าตัดกรวยเติม แต่สามารถนำมาช่วยอธิบายในกรณีของหัวฉีดสเปรย์ประเภทหน้าตัดกรวยกลวงนี้ได้ด้วยเช่นกัน เนื่องจากมีกลไกการแตกตัวในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือเมื่อ ΔP เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า $K(r_k)$ และ $C_{v,k}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ด้านขอบนอกของหน้าตัดสเปรย์ในช่วงระยะ z ที่สเปรย์ยังมีโมเมนตัมสามารถเอาชนะแรงต้านอากาศได้อยู่ เนื่องจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของการไหลภายในหัวฉีดสูงขึ้น ทำให้ conical sheet มีความเร็วสูงขึ้นทั้ง axial และ radial

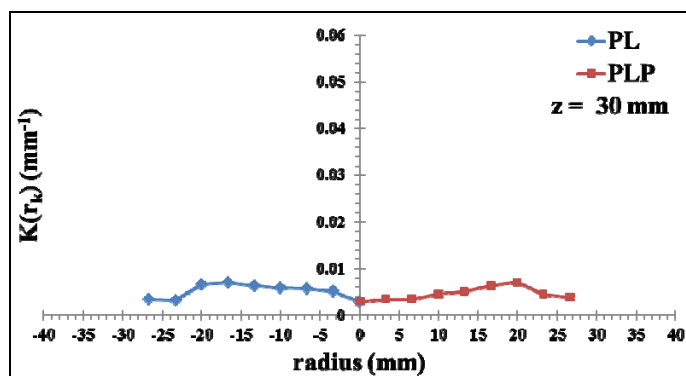
สุดท้ายนี้ พบว่าผลของ $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งใดๆ ที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงและใช้เทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุด ได้แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของอัลกอริทึมในการคำนวณ โดยได้แสดงผลของ $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งใดๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสเปรย์ แสดงถึงการไม่มีหยดอยู่ในบริเวณตรงกลางที่เป็นพื้นที่ของกรวยกลวง จึงสามารถสรุปได้ว่าอัลกอริทึมของเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดที่ได้พัฒนาขึ้นมา [19, 20] มีความถูกต้องเชื่อถือได้ดีเยี่ยม



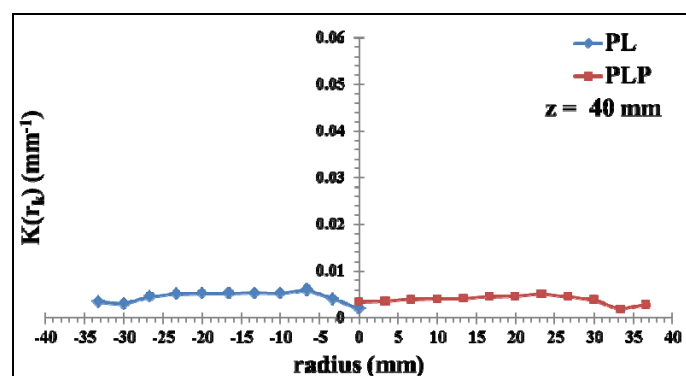
ก) $z = 10$ mm



ข) $z = 20$ mm

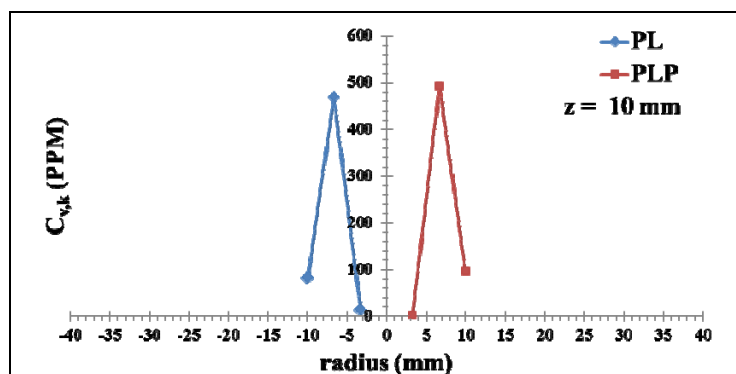


ค) $z = 30$ mm

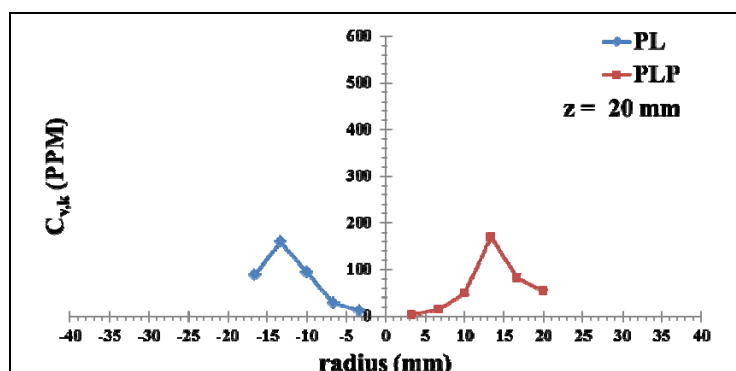


ง) $z = 40$ mm

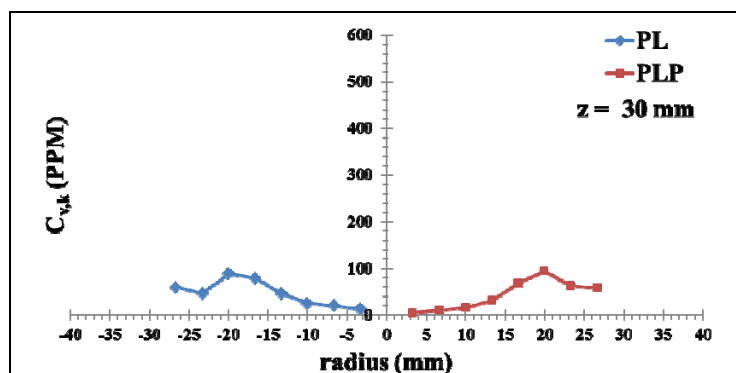
รูปที่ 4-8 $K(r_k)$ ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปกตรัมจากหัวฉีดสองชนิดที่ระยะ z ต่างๆ
($\Delta P = 10$ bar)



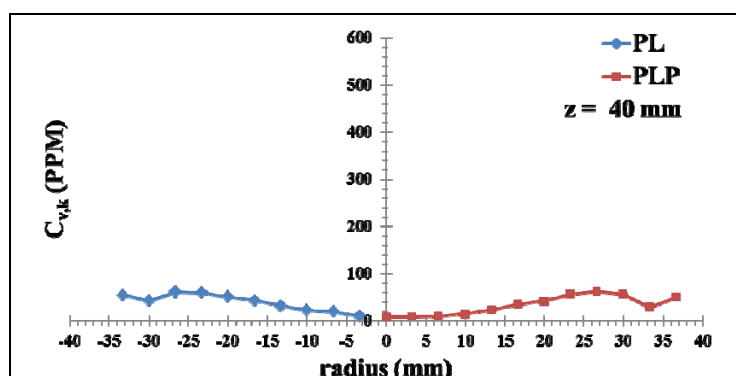
น) $z = 10$ mm



จ) $z = 20$ mm



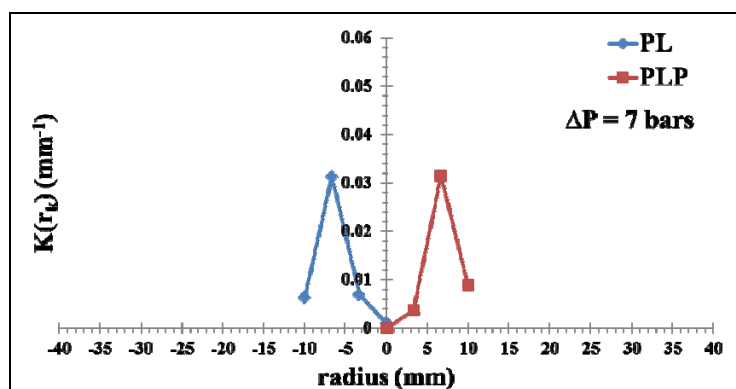
ฉ) $z = 30$ mm



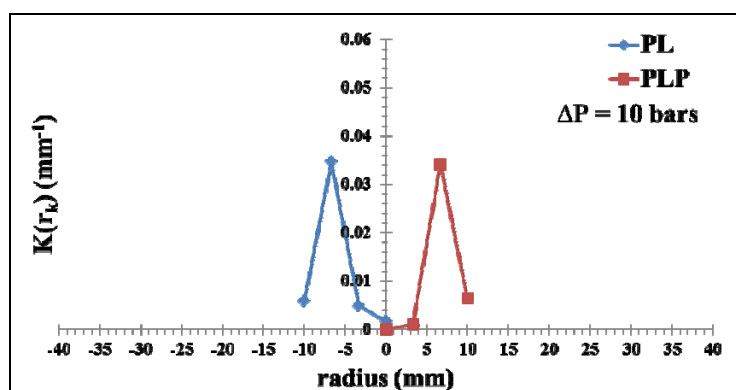
ง) $z = 40$ mm

รูปที่ 4-9 $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งใด ๆ ของสเปรย์น้ำจากหัวฉีดสองชนิดที่ระยะ z ต่างๆ

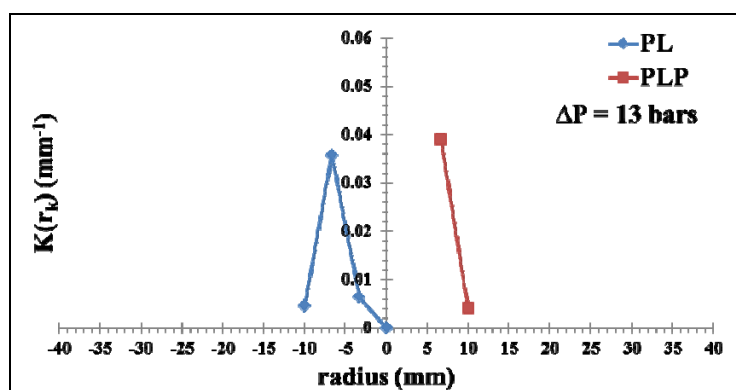
($\Delta P = 10$ bar)



ก) $\Delta P = 7$ bar

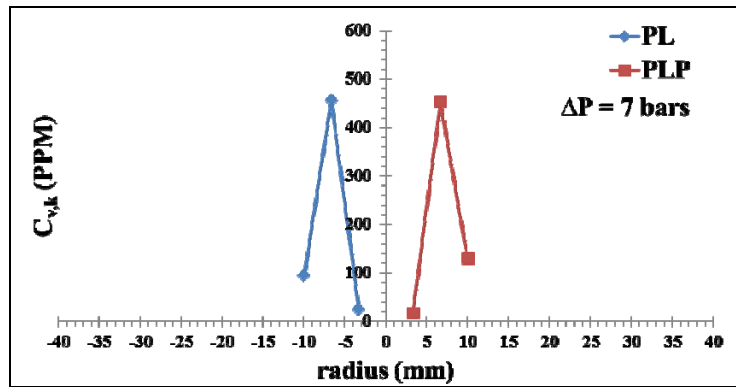


ข) $\Delta P = 10$ bar

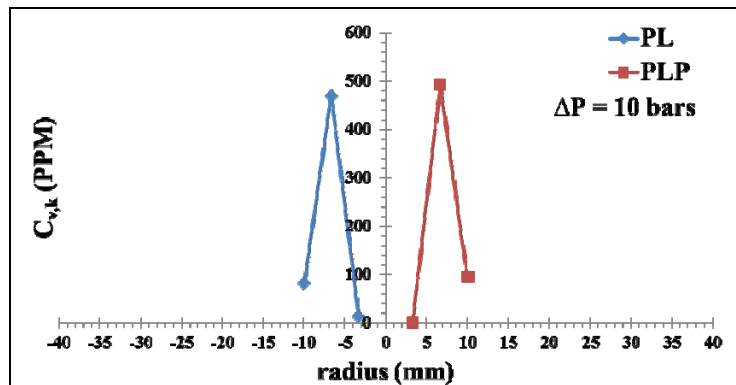


ค) $\Delta P = 13$ bar

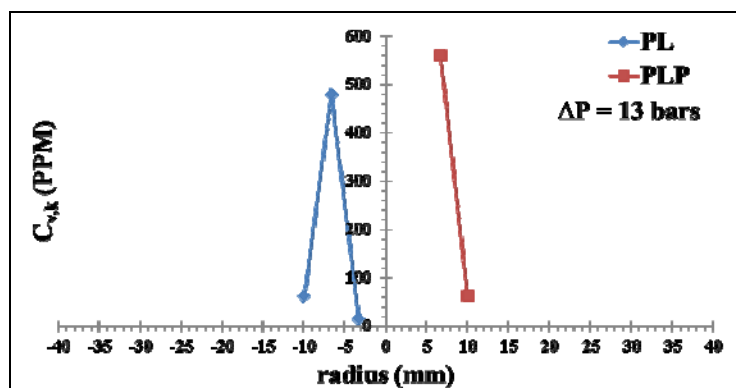
รูปที่ 4-10 $K(r_k)$ ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำจากหัวฉีดสองชนิดที่ความดันต่างๆ
($z = 10$ mm)



ก) ที่ความดัน 7 บาร์



ข) ที่ความดัน 10 บาร์



ค) ที่ความดัน 13 บาร์

รูปที่ 4-11 $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำจากหัวฉีดสองชนิดที่ความดันต่างๆ
($z = 10$ mm)

4.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลเพื่อเปรียบเทียบกับสเปรย์ของดีเซล

เนื้อหาในส่วนนี้เป็นงานวิจัยในส่วนที่สอง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลที่ได้จากหัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวง และทำการเปรียบเทียบกับสเปรย์ของดีเซล นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มอุณหภูมิของไบโอดีเซล เพื่อให้การกระจายตัวของขนาดหยดของสเปรย์ไบโอดีเซลละเอียดขึ้นใกล้เคียงกับของสเปรย์ดีเซล โดยการทดลองเบื้องต้นจากการวัดการกระจายตัวของขนาดหยดในแนววิถีด้วย Malvern Spraytec พบว่าที่ 55°C ของน้ำมันไบโอดีเซลจะให้สเปรย์ที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ 30°C หัวฉีดที่ใช้ในการทดลองนี้คือ PLP ขนาด 2.25 GPH เพียงหัวเดียว

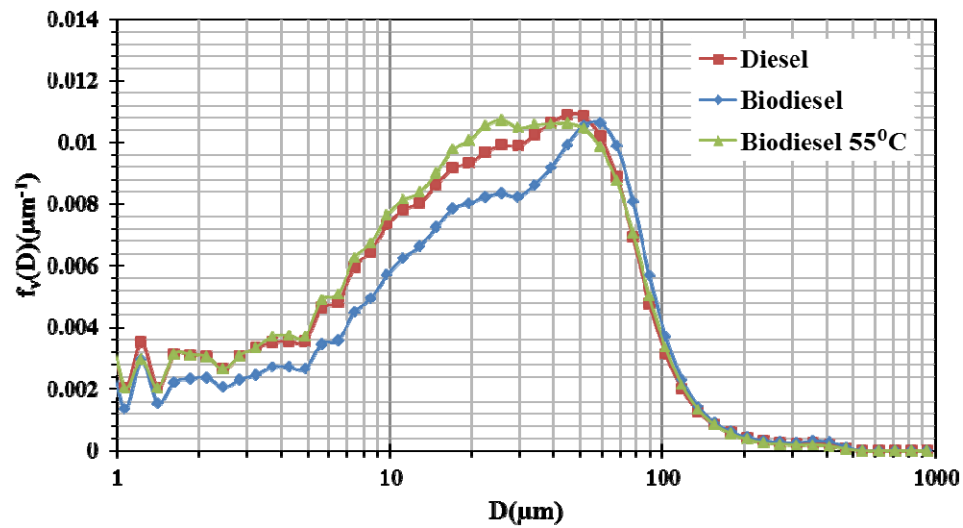
4.2.1 การกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตรในแนววิถี

รูปที่ 4-12 แสดงผลการวัดในแนววิถีเบื้องต้น (path measurement) ผ่านกึ่งกลางหน้าตัดสเปรย์ ($y = 0$ mm) ด้วย Malvern Spraytec พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันที่ 30°C สเปรย์ไบโอดีเซลจะมีสัดส่วนของหยดขนาดใหญ่มากกว่าของสเปรย์ดีเซลทุกความดันฉีด โดยความแตกต่างนี้น้อยลงเมื่อความดันฉีดเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเป็น 55°C พบว่ามีการกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตร $f_v(D)$ ในแนววิถีใกล้เคียงกับของสเปรย์ดีเซลอย่างมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ความหนืดของไบโอดีเซลลดลง และมีค่าเข้าใกล้ค่าความหนืดของดีเซล จึงทำให้กลไกการไหลภายในหัวฉีดและการแตกตัวมีความใกล้เคียงกัน ทำให้ได้สเปรย์ที่ละเอียดพอๆ กัน อย่างไรก็ตามผลในแนววิถีนี้ ไม่สามารถบอกได้ทั้งหมดว่า โครงสร้างสเปรย์ภายในเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

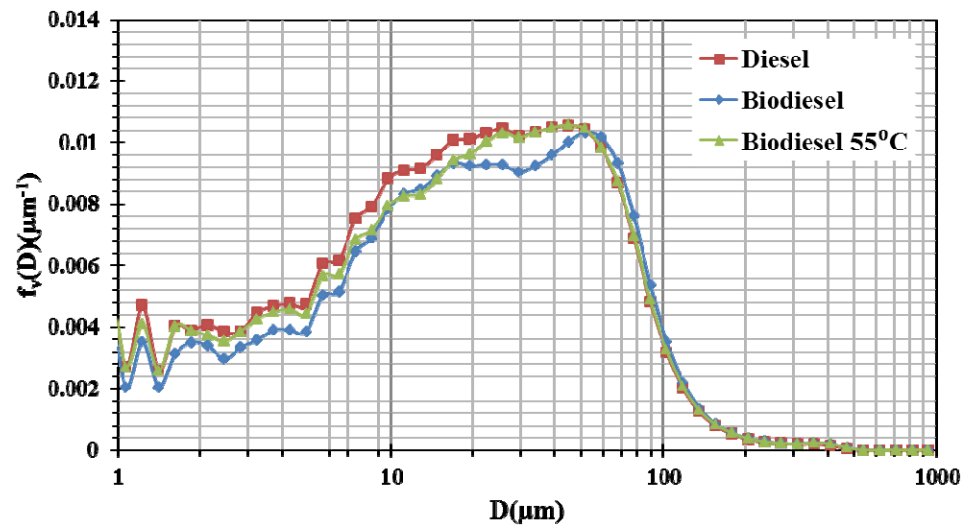
4.2.2 การกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ

รูปที่ 4-13 ถึง 4-15 แสดงการกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตร $f_v(D)$ ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ความดันฉีด 10 bar โดยทำการวัดบนหน้าตัดสเปรย์ 3 ระยะ คือ $z = 10, 20$ และ 30 mm ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่า หน้าตัดสเปรย์ของน้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ไม่พบการมีอยู่ของหยดสเปรย์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางหน้าตัด ($r_k = 0$ mm) ที่ระยะ $z = 10$ mm เท่านั้น ขนาดหยดบนหน้าตัดสเปรย์ตามแนวรัศมี มีลักษณะเหมือนกับการทดลองด้วยน้ำในหัวช้อก่อนหน้า คือ มีหยดขนาดเล็กอยู่บริเวณแกนกลางของสเปรย์ และหยดขนาดใหญ่อยู่บริเวณขอบด้านนอกของสเปรย์ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับค่าหยดเฉลี่ย D_{32} ที่แสดงในรูปที่ 4-16

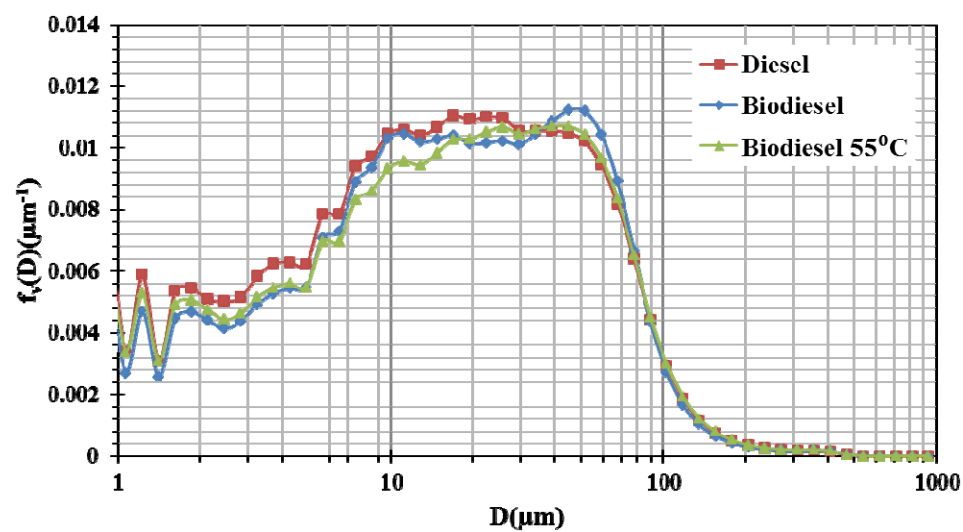
รูปที่ 4-16 แสดง D_{32} ณ ตำแหน่งใด ๆ ของสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ระยะ $z = 10, 20$ และ 30 mm โดยใช้ความดันฉีด 10 bar ซึ่งเป็นค่าหยดเฉลี่ย D_{32} ของ $f_v(D)$ ที่แสดงในรูปที่ 4-13 ถึง 4-15 จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดหยด D_{32} ของสเปรย์ไบโอดีเซลมีขนาดใหญ่มากกว่าของสเปรย์ดีเซลที่อุณหภูมิเดียวกัน (30°C) เล็กน้อยที่บริเวณขอบด้านนอกของหน้าตัดสเปรย์ ขณะที่บริเวณด้านในตรงกลางของหน้าตัดสเปรย์จะมีขนาด D_{32} ใกล้เคียงกัน เมื่อให้ความร้อนกับไบโอดีเซลจนมีอุณหภูมิ 55°C พบว่ามี D_{32} มีขนาดเล็กลงโดยเห็นได้อย่างชัดเจนบริเวณขอบด้านนอกของหน้าตัดสเปรย์ ทำให้ขนาดหยด D_{32} มีแนวโน้มใกล้เคียงกับของสเปรย์ดีเซล



ก) $\Delta P = 7$ bar

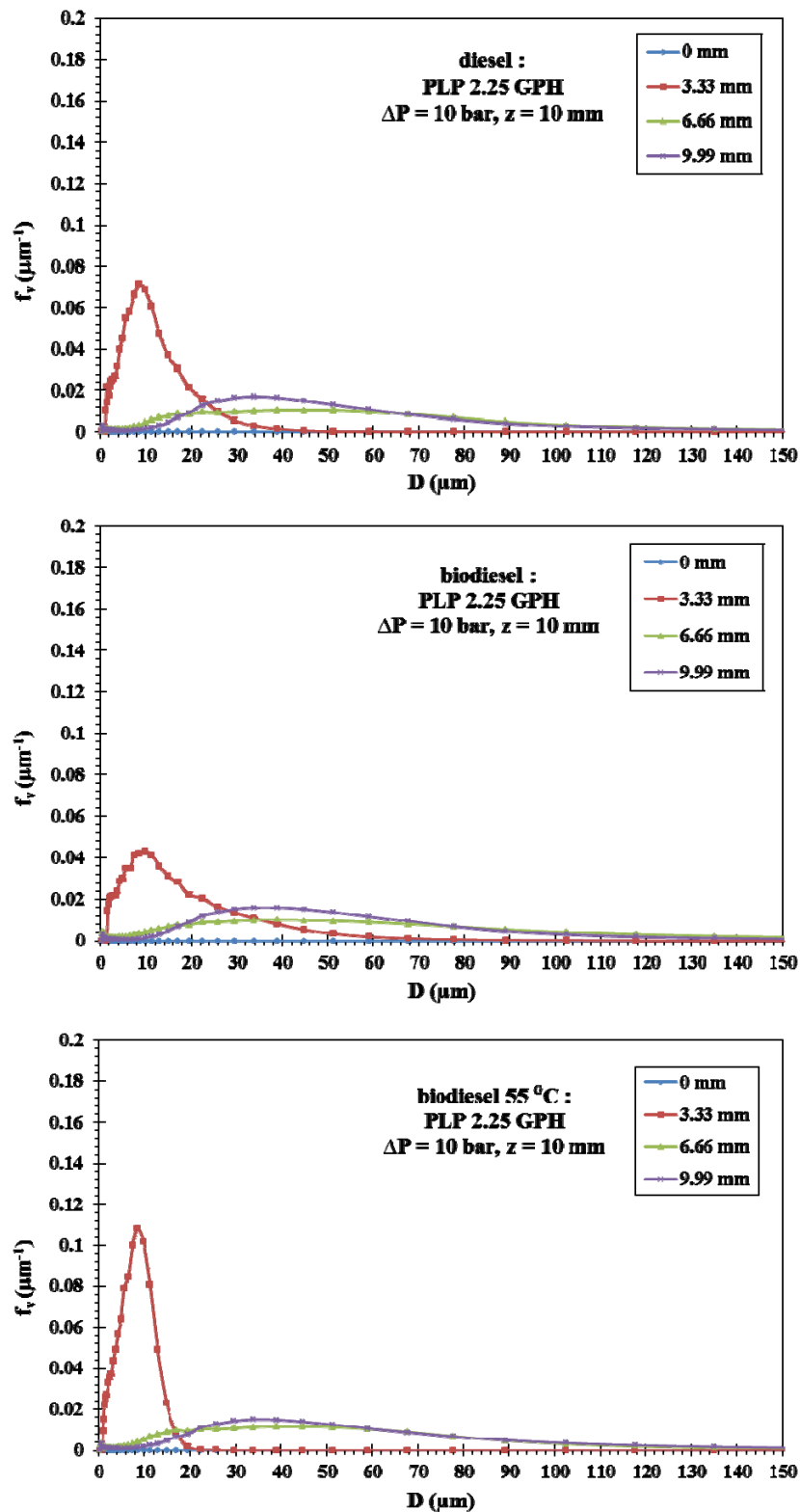


ข) $\Delta P = 10$ bar

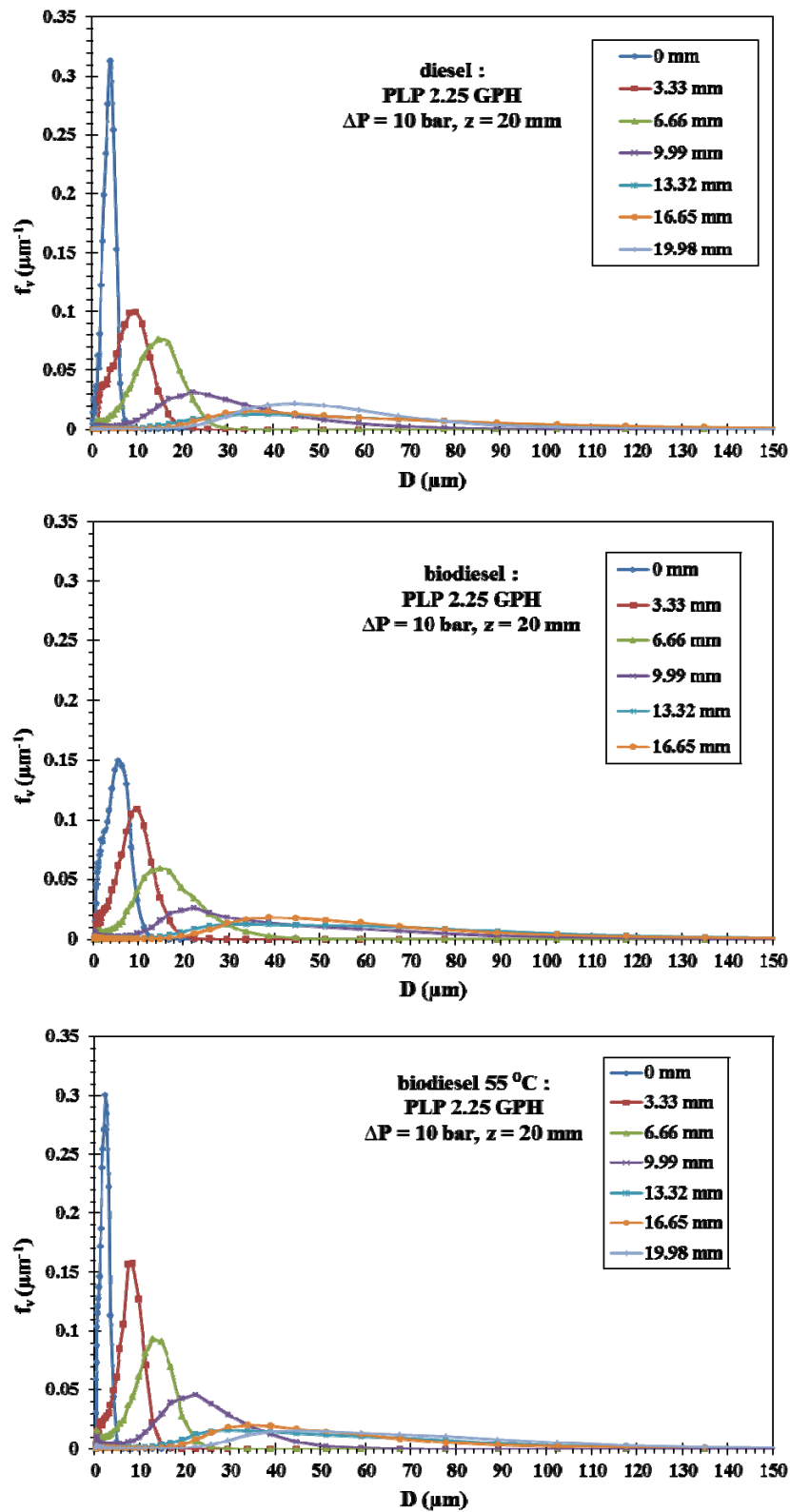


ค) $\Delta P = 13$ bar

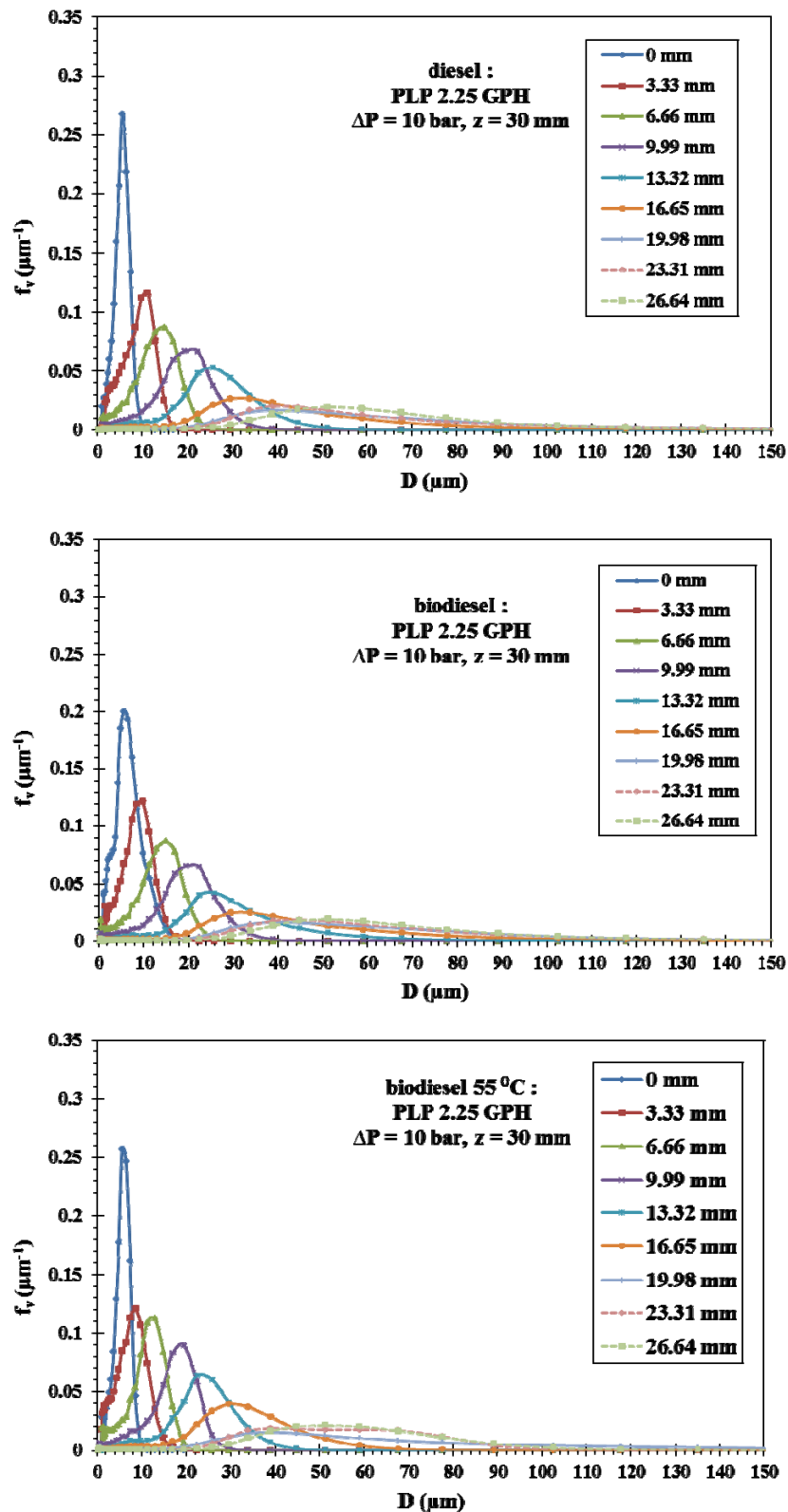
รูปที่ 4-12 การกระจายตัวของขนาดหยดในแนววิถีของสเปรย์น้ำมันที่ความดันต่างๆ
($y = 0$ mm และ $z = 10$ mm)



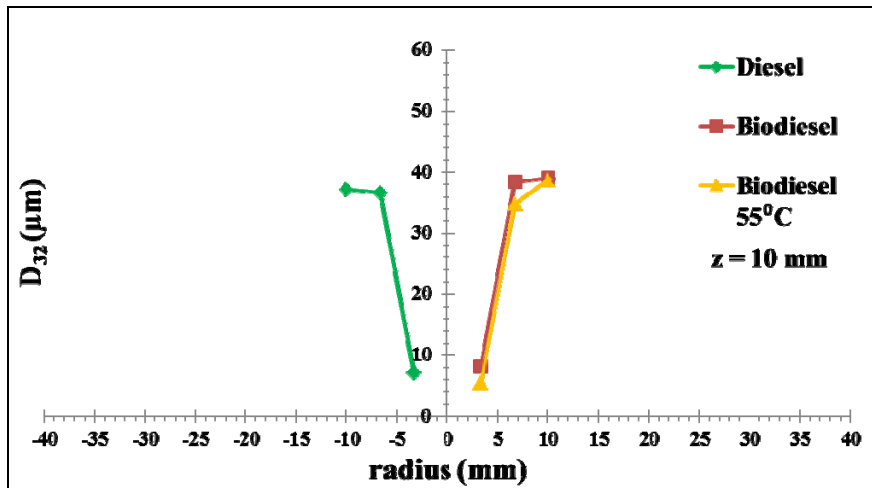
รูปที่ 4-13 การกระจายตัวของขนาดหยด ณ ตำแหน่งใด ๆ ของสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง
($\Delta P = 10$ bar, $z = 10$ mm)



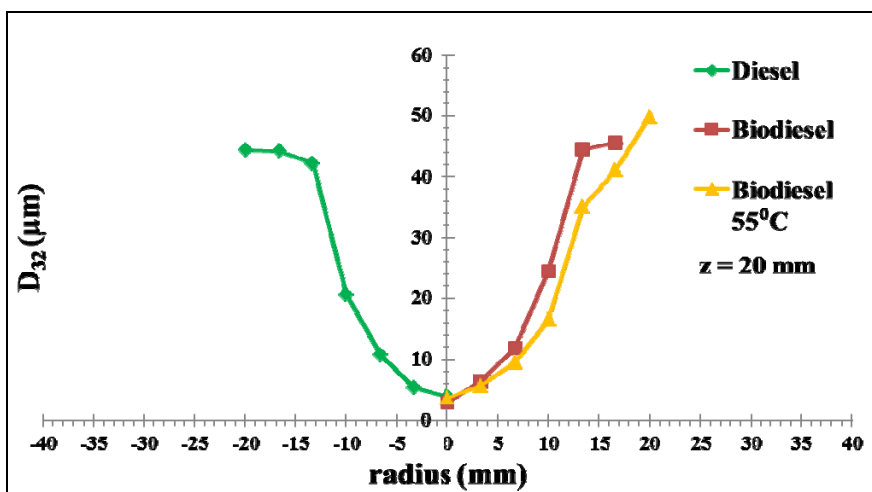
รูปที่ 4-14 การกระจายตัวของขนาดหยด ณ ตำแหน่งใด ๆ ของสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง
($\Delta P = 10$ bar, $z = 20$ mm)



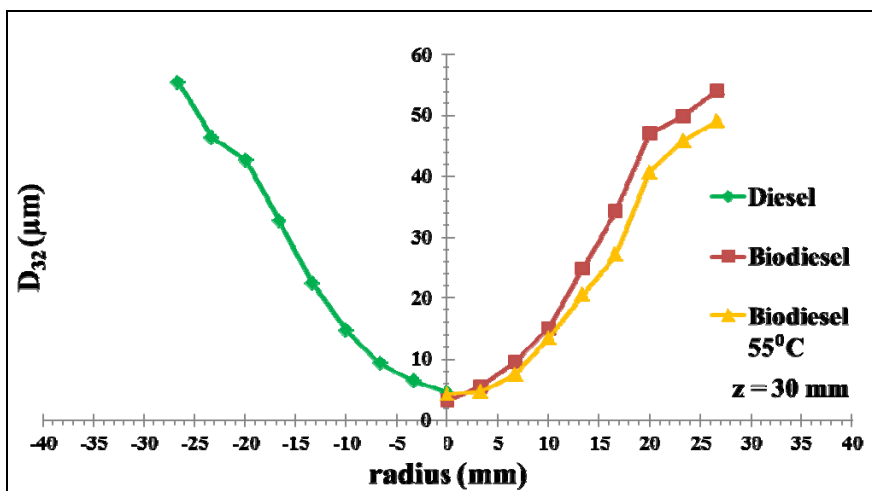
รูปที่ 4-15 การกระจายตัวของขนาดหยด ณ ตำแหน่งใด ๆ ของสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง
($\Delta P = 10 \text{ bar}, z = 30 \text{ mm}$)



ก) $z = 10$ mm



ข) $z = 20$ mm



ค) $z = 30$ mm

รูปที่ 4-16 D_{32} ณ ตำแหน่งใด ๆ ของสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ระยะ z ใดๆ
($\Delta P = 10$ bar)

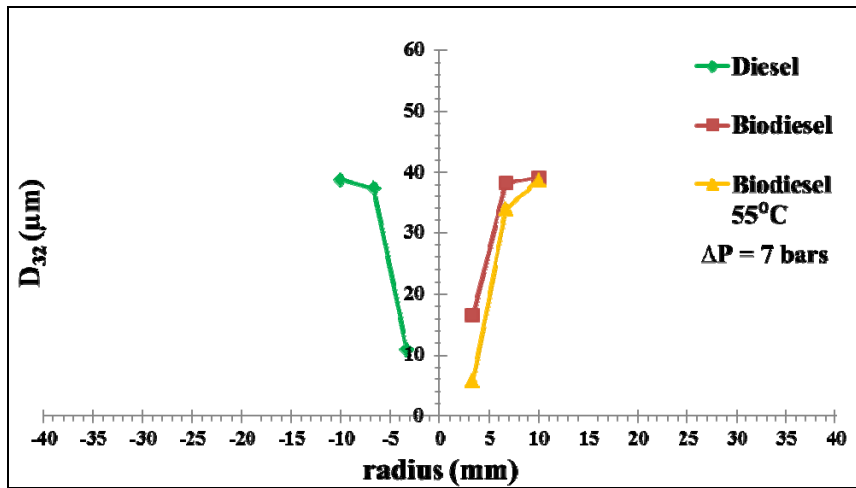
สาเหตุที่ไม่พบกรวยกลวงบนหน้าตัดสเปรย์ของน้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ระยะ $z = 20$ และ 30 mm เหมือนกับกรณีของสเปรย์น้ำ เนื่องจากความหนืดของน้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าสูงกว่าความหนืดของน้ำมาก โดยดีเซลและไบโอดีเซลที่ 30°C มีความหนืดเท่ากับ 3.37 และ 5.65 mm^2/s ตามลำดับ ในขณะที่น้ำมีความหนืดเพียง 1 mm^2/s เท่านั้น ความหนืดที่สูงกว่านี้ส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานของการไหลภายในหัวฉีดมากกว่า ทำให้การไหลวนสร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางได้น้อยลง ส่งผลให้ความเร็วของ conical sheet ในทิศ radial มีค่าลดลง การแตกตัวของ conical sheet จึงเกิดกรวยกลวงที่เล็กกว่าได้

รูปที่ 4-17 แสดง D_{32} ณ ตำแหน่งใด ๆ ของสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง บนหน้าตัดสเปรย์ $z = 10$ mm ห่างจากหัวฉีดที่ความดันต่าง ๆ พบว่าเมื่อความดันฉีดเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาด D_{32} ลดลงโดยเฉพาะที่บริเวณขอบด้านนอกของหน้าตัดสเปรย์ นอกจากนี้ยังทำให้เห็นความแตกต่างของ D_{32} ระหว่างสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่างน้อยลง หมายความว่าเมื่อความดันฉีดเพิ่มขึ้น

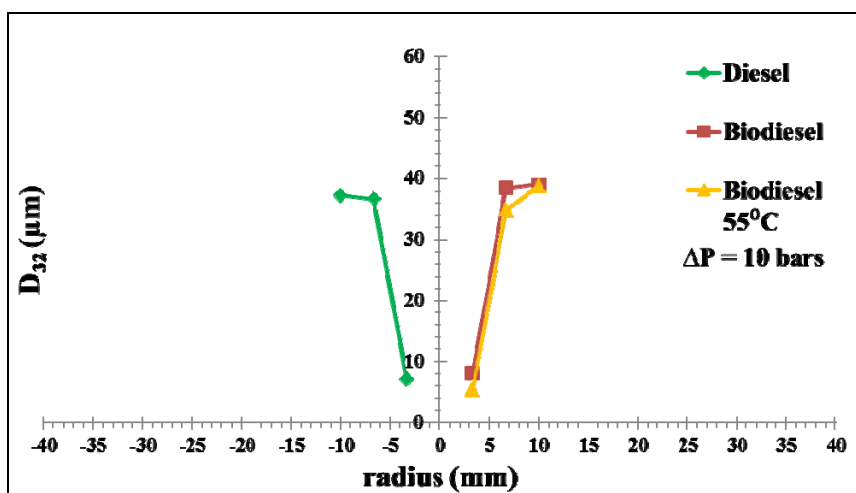
4.2.3 ความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใด ๆ

รูปที่ 4-18 แสดงค่า $K(r_k)$ ณ ตำแหน่งใด ๆ ของสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ความดันฉีด 10 bar บนหน้าตัดสเปรย์ที่ระยะ z ต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้ของค่า $K(r_k)$ ตามแนวรัศมี พบว่ามี 2 ลักษณะที่แตกต่างกัน ลักษณะแรกพบบนหน้าตัดสเปรย์ $z = 10$ และ 20 mm ซึ่งค่า $K(r_k)$ มีค่าน้อยที่ตำแหน่งกึ่งกลางหน้าตัดและมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งระหว่างกึ่งกลางและขอบของหน้าตัดสเปรย์ จากนั้นมีค่าลดลงจนถึงขอบของสเปรย์ ผลที่ได้แบบแรกนี้คล้ายกับผลที่ได้ในการทดสอบสเปรย์น้ำที่มีหน้าตัดกรวยกลวงในหัวฉีดก่อนหน้า สำหรับลักษณะที่สองพบว่าคล้ายกับของกรณีสเปรย์แบบหน้าตัดกรวยเต็มที่พบในงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งเป็นการวัดคุณลักษณะของสเปรย์หน้าตัดกรวยเต็มด้วยเลเซอร์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm ที่หน้าตัดสเปรย์ห่างจากหัวฉีด $z = 30, 40$ และ 50 mm โดยพบว่าค่า $K(r_k)$ มีค่าสูงสุดที่กึ่งกลางหน้าตัดสเปรย์ และค่อย ๆ มีค่าลดลงจนมีค่าน้อยที่สุดที่ขอบของสเปรย์ [20] จากผลที่ได้ในครั้งนี้ ทำให้อธิบายได้ว่าเป็นผลมาจาก air entrainment ที่ผลักให้หยดขนาดเล็กเข้ามาตรงกลางหน้าตัดสเปรย์มากขึ้นที่ downstream ทำให้ค่า $K(r_k)$ มีค่าสูงสุดที่ตรงกลางของหน้าตัดสเปรย์และมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ตามแนวรัศมีจนถึงขอบของสเปรย์ ซึ่งสามารถพบได้ทั้งสเปรย์หน้าตัดกรวยเต็มและหน้าตัดกรวยกลวงที่เป็นหัวฉีดประเภทความดันหมุนวนเหมือนกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะ downstream โดยหัวฉีดแบบหน้าตัดกรวยกลวงจะเกิด air entrainment ผลักหยดขนาดเล็กเข้ามาตรงกลางหน้าตัดสเปรย์ช้ากว่านั่นเอง รวมถึงขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทำงานของหัวฉีดและของเหลวทดสอบ

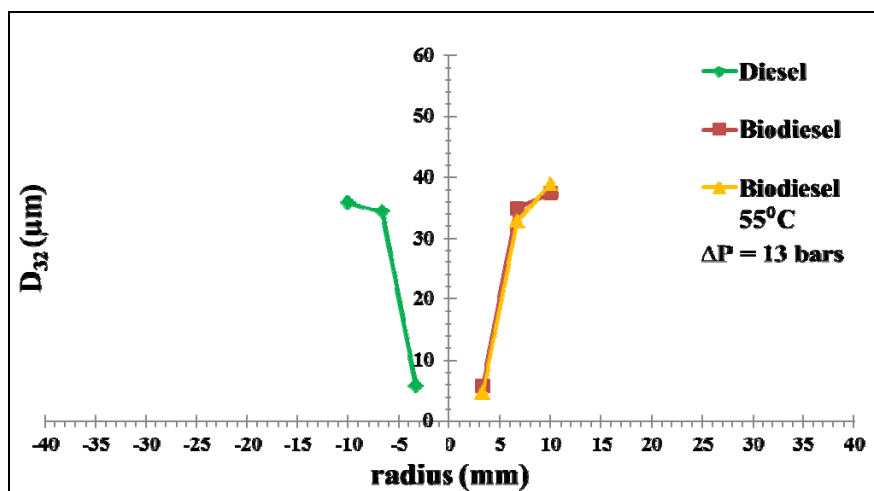
เมื่อพิจารณา $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งใด ๆ ในรูปที่ 4-19 พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับสเปรย์น้ำในหัวฉีดก่อนหน้า เพียงแต่พบกรวยกลวงเฉพาะที่หน้าตัดสเปรย์ที่ระยะ $z = 10$ mm เท่านั้น คือมีค่า $C_{v,k} = 0$ ที่กึ่งกลางหน้าตัดสเปรย์ ขณะที่หน้าตัดสเปรย์ที่ระยะ $z = 20$ และ 30 mm ไม่พบกรวยกลวงจากการวัดด้วยเทคนิคที่นำเสนอนี้ แสดงว่ากรวยกลวงของสเปรย์น้ำมันทั้งสามตัวอย่างมีขนาดเล็กกว่ากรวยกลวงของสเปรย์น้ำ โดยงานทดลองนี้ไม่สามารถเห็นความ



ก) $\Delta P = 7$ bar

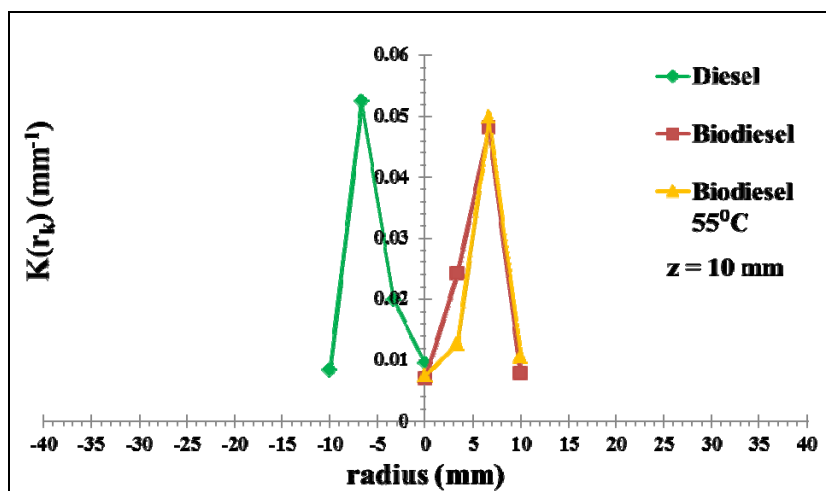


ข) $\Delta P = 10$ bar

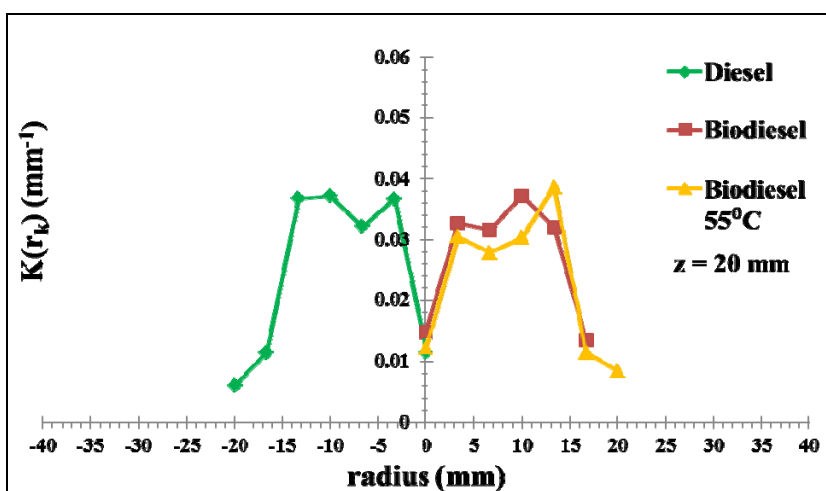


ค) $\Delta P = 13$ bar

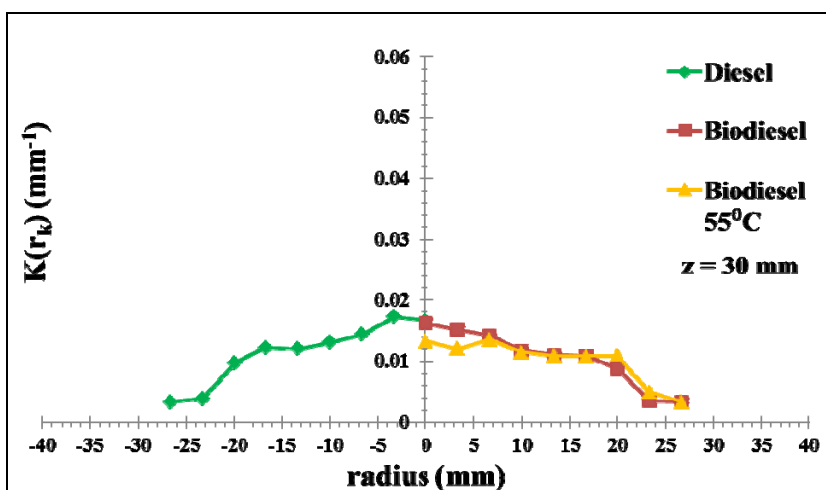
รูปที่ 4-17 D_{32} ณ ตำแหน่งใด ๆ ของสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ความดันต่าง ๆ
($z = 10$ mm)



น) $z = 10 \text{ mm}$

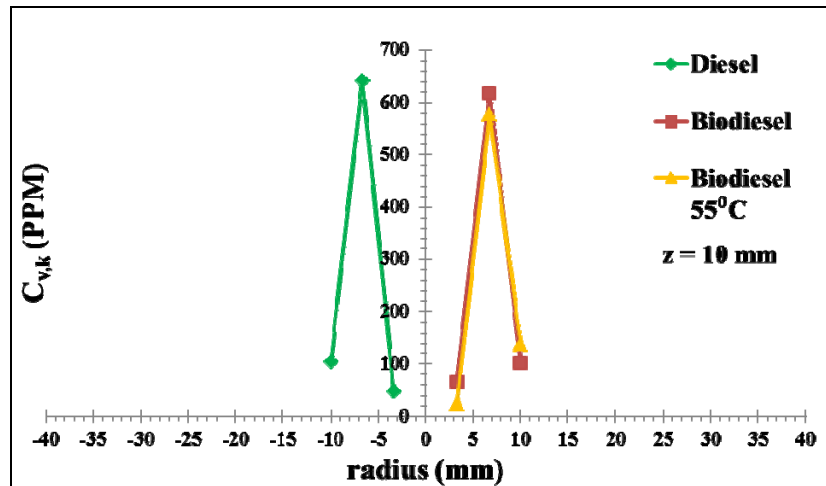


ข) $z = 20 \text{ mm}$

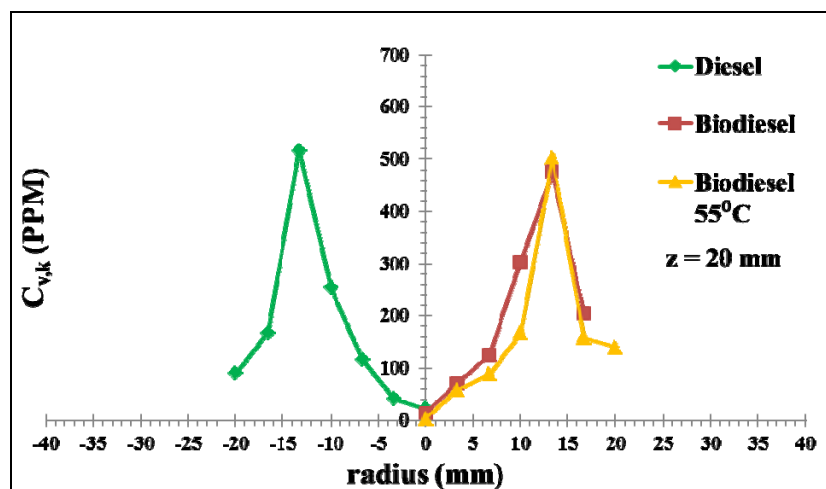


ค) $z = 30 \text{ mm}$

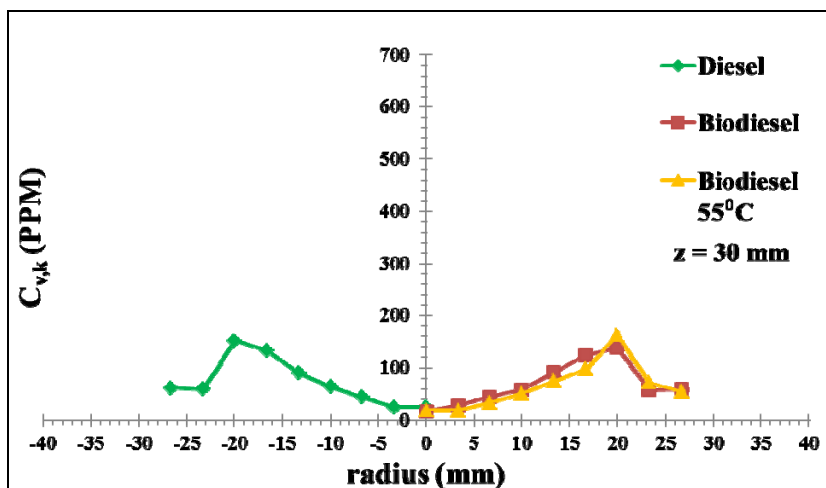
รูปที่ 4-18 $K(r_k)$ ณ ตำแหน่งใด ๆ ของสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ระยะ z ใด ๆ
($\Delta P = 10 \text{ bar}$)



ก) $z = 10$ mm



ข) $z = 20$ mm



ค) $z = 30$ mm

รูปที่ 4-19 $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งใดๆ ของสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ระยะ z ใดๆ
($\Delta P = 10$ bar)

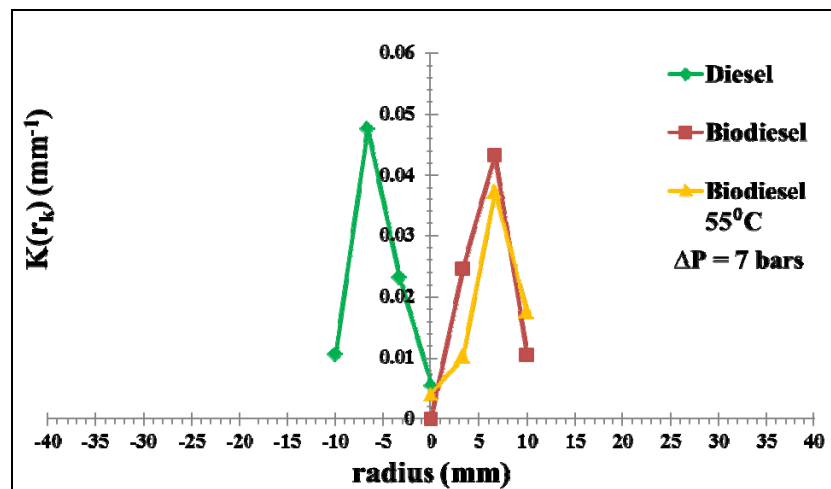
แตกต่างของขนาดกรวยกลวงระหว่างสเปรย์น้ำมันทั้งสามตัวอย่างได้ เนื่องจากผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก

เมื่อพิจารณาค่า $K(r_k)$ ร่วมกับ $C_{v,k}$ ที่ระยะ $z = 10$ และ 20 mm พบว่ามีสอดคล้องกัน และเหมือนกับผลที่ได้กับสเปรย์น้ำ ยกเว้นที่ระยะ $z = 30$ mm พบว่าสเปรย์น้ำมันทั้งสามตัวอย่างแสดงค่า $K(r_k)$ สูงสุดที่ตำแหน่งตรงกลางแต่ค่า $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งดังกล่าวกลับมีค่าน้อย ทั้งนี้เนื่องจากค่า $C_{v,k}$ จะขึ้นอยู่กับค่า D_{32} ด้วย ซึ่ง ณ ตำแหน่งดังกล่าวค่า D_{32} มีค่าน้อยนั่นเอง ซึ่งเป็นหยดขนาดเล็กมากที่ถูก air entrainment ผลักเข้ามา

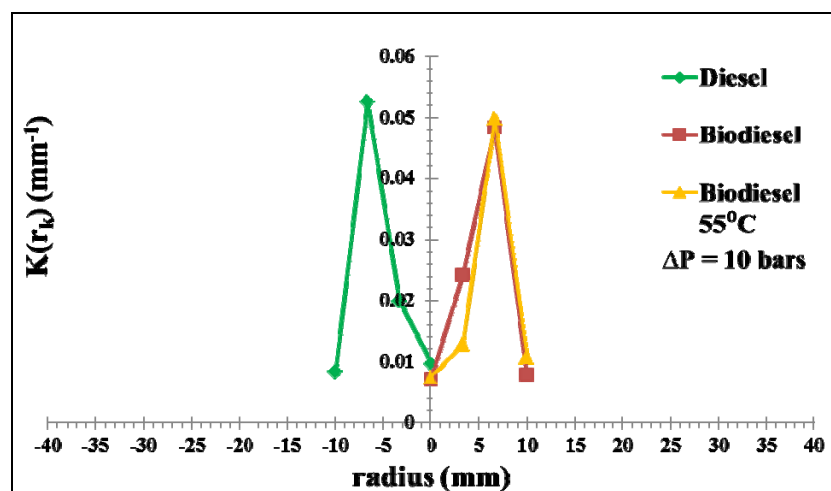
เมื่อพิจารณาค่า $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งใดๆ ของน้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่ามีความใกล้เคียงกันมาก แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อสังเกตจะพบว่าน้ำมันที่มีความหนืดน้อยกว่ามีแนวโน้มที่ให้ค่าสูงสุดของค่า $K(r_k)$ และ $C_{v,k}$ เลื่อนออกไปทางด้านขอบนอกของสเปรย์มากกว่า เนื่องจากของเหลวที่มีความหนืดน้อยกว่าจะเกิดการสูญเสียของการไหลภายในหัวฉีดน้อยกว่า ทำให้เกิดการไหลวน (swirling flow) สามารถสร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางได้มากกว่า ส่งผลให้มีมุมของ conical sheet และความเร็วของ sheet ในแนว radial มากขึ้น จึงเกิดการกระจายของหยดสเปรย์ของเหลวไปทางขอบด้านนอกของหน้าตัดสเปรย์ได้มากขึ้นนั่นเอง

ในกรณีที่เพิ่มความดันฉีดมากขึ้นจาก 7 bar จนถึง 13 bar พบว่าความแตกต่างของค่า $K(r_k)$ และ $C_{v,k}$ ระหว่างน้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง จะยิ่งน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4-20 และ 4-21 เป็นการวัดบนหน้าตัดสเปรย์ที่ระยะ $z = 10$ mm แสดงให้เห็นว่าความหนืดที่แตกต่างกันมีผลน้อยลงเมื่อความดันฉีดเพิ่มขึ้น

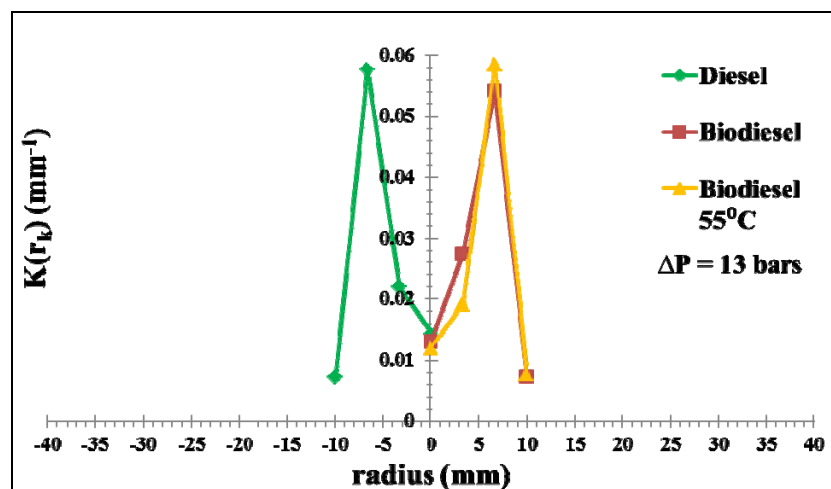
สุดท้ายนี้จะเห็นว่าการใช้เทคนิคคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดร่วมกับการวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงเพื่อหาการกระจายตัวของขนาดหยดและความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ นี้ มีประสิทธิภาพและมีประโยชน์อย่างมากต่อการศึกษาคูณลักษณะโครงสร้างภายในของสเปรย์ ที่เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงไม่สามารถทำได้ ช่วยให้สามารถทราบถึงผลกระทบของ รูปร่าง/ชนิดของหัวฉีด ชนิดของเหลวทดสอบ และรวมถึงเงื่อนไขการทำงานที่ต่างกันได้ ทำให้สามารถเข้าใจกลไกการแตกตัวของหัวฉีดชนิดต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น



ก) $\Delta P = 7$ bar

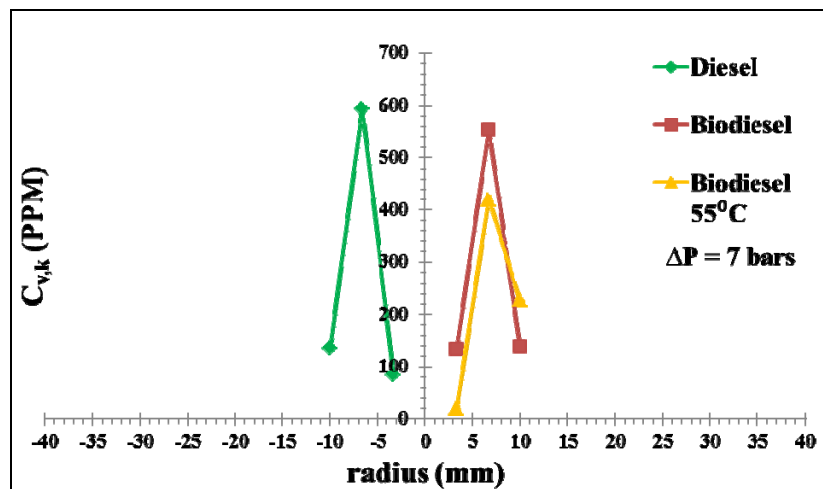


ข) $\Delta P = 10$ bar

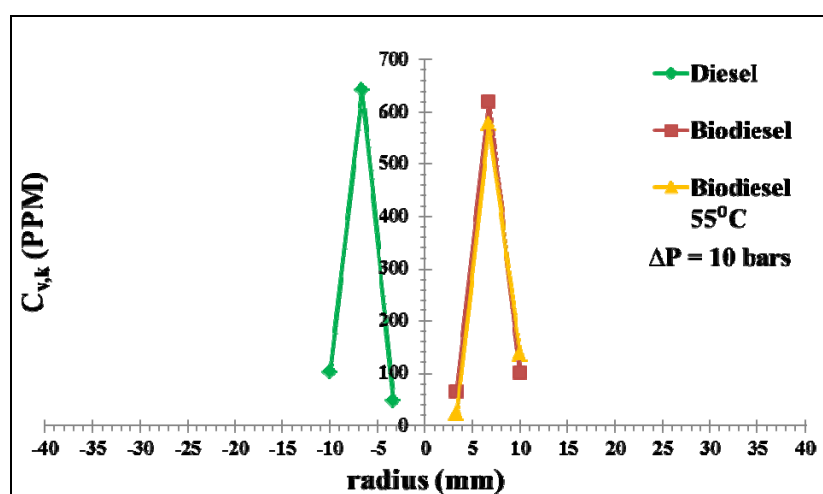


ค) $\Delta P = 13$ bar

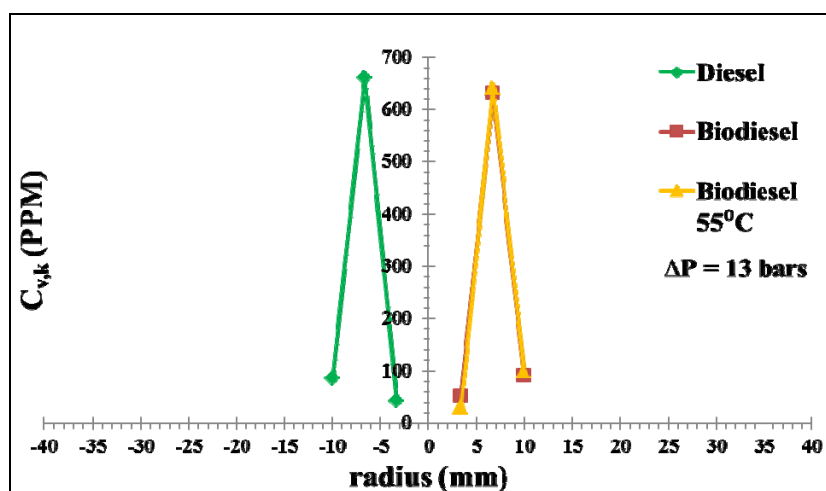
รูปที่ 4-20 $K(r_k)$ ณ ตำแหน่งใด ๆ ของสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ความดันต่าง ๆ
($z = 10$ mm)



ก) $\Delta P = 7$ bar



ข) $\Delta P = 10$ bar



ค) $\Delta P = 13$ bar

รูปที่ 4-21 $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งใด ๆ ของสเปร์ย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ความดันต่าง ๆ
($z = 10$ mm)

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานของโครงการ

จากผลการดำเนินงานของโครงการวิจัย สามารถสรุปแยกเป็นประเด็นตามวัตถุประสงค์ได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปการตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมและศึกษาคูณลักษณะของสเปรย์น้ำเบื้องต้น

ในการตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดเพื่อคำนวณหาค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตร $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งใดๆ พบว่าห้วงจิตความดันหมุนวนประเภทหน้าตัดกรวยกลวง ได้แสดงผลของ $C_{v,k}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งตรงกลางของสเปรย์ ($r_k = 0$ mm) แสดงถึงการไม่มีหยดอยู่ในบริเวณตรงกลางที่เป็นพื้นที่ของกรวยกลวง จึงสรุปได้ว่าอัลกอริทึมของเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดที่ได้พัฒนาขึ้นมา [19, 20] มีความถูกต้องเชื่อถือได้ดี

สำหรับการศึกษาโครงสร้างของสเปรย์น้ำที่ได้จากห้วงจิตความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวง PLP และ PL ขนาด 2.5 GPH ได้พิจารณาคูณลักษณะของสเปรย์ ณ ตำแหน่งใดๆ ในเทอมของ $f_v(D)$, D_{32} และ $C_{v,k}$ ที่ได้จากเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุด โดยมีรายละเอียดหลักที่สามารถสรุปได้ดังนี้

1) เมื่อเปรียบเทียบห้วงจิตความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยกลวง PLP และ PL กับห้วงจิตความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยเต็ม (type R) จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [19, 20] พบว่าโครงสร้างสเปรย์ในเทอมของ $f_v(D)$, D_{32} และ $C_{v,k}$ มีความคล้ายคลึงกัน ทั้งนี้เนื่องจากมีกลไกการแตกตัวของ conical sheet เหมือนกัน โดยบริเวณตรงกลางหน้าตัดของสเปรย์จะมีสัดส่วนของหยดขนาดเล็ก ขณะที่บริเวณขอบจะพบสัดส่วนของหยดขนาดใหญ่กว่า เพราะความดันภายในสเปรย์ต่ำกว่าอากาศภายนอกทำให้เกิด air entrainment พัดพาเอาหยดขนาดเล็กเข้าไปสู่กึ่งกลางของหน้าตัดสเปรย์ โครงสร้างภายในของสเปรย์ไม่ว่าจะเป็น ขนาดหยด และความเข้มข้นเชิงปริมาตร รวมถึงขนาดและการมีอยู่ของกรวยกลวงจะขึ้นอยู่กับ ระดับความรุนแรงของการไหลวนที่สร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของการไหลภายในรูออริฟิซ

2) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างห้วงจิตความดันหมุนวนประเภทหน้าตัดกรวยเต็ม PL และ PLP พบว่าสเปรย์ของห้วงจิต PL มีขนาดหยดละเอียดกว่าสเปรย์ของห้วงจิต PLP เล็กน้อย และมีกรวยกลวงที่ใหญ่กว่า ความแตกต่างนี้มีสาเหตุมาจาก nozzle geometry ที่แตกต่างกัน ที่ทำให้ห้วงจิต PL สร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของของเหลวได้มากกว่าที่ทางออกของรูออริฟิซ ส่งผลให้ conical sheet บางกว่า

3) เมื่อพิจารณาผลของ downstream หรือหน้าตัดสเปรย์ที่ระยะ z แตกต่างกัน พบว่า D_{32} มีขนาดใหญ่มากขึ้นตาม downstream ทั้งนี้เนื่องมาจากการลดลงของโมเมนตัมของหยดใหญ่ที่ทำให้หยดชิดกันช้ากว่าหยดเล็ก จึงทำให้มีสัดส่วนของหยดขนาดใหญ่ใน measurement

volume มากขึ้นตาม downstream โดยผลที่ได้นี้สอดคล้องกับหัวฉีดความดันหมุนวนที่มีหน้าตัดกรวยเต็มในงานวิจัยก่อนหน้า [20] เมื่อพิจารณา $C_{v,k}$ พบว่ามีลักษณะที่กระจายแบบราบมากขึ้นโดยมีค่าลดลงตาม downstream เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของสเปรย์มีขนาดใหญ่ขึ้นตาม downstream ยกเว้นที่กึ่งกลางสเปรย์ที่ $C_{v,k}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก air entrainment ที่ผลึกหยดขนาดเล็กมากเข้ามายังกึ่งกลางของหน้าตัดสเปรย์ที่ downstream มากขึ้น จนปรากฏค่า $C_{v,k}$ ไม่เท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสเปรย์กรณีของหัวฉีด PLP ที่ $z = 40$ mm

4) เมื่อพิจารณาผลกระทบของความดัน พบว่าสเปรย์มีขนาดหยดเล็กลงเมื่อความดันฉีดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะบริเวณขอบด้านนอกของหน้าตัดสเปรย์ ซึ่งเป็นบริเวณ downstream ของการแตกตัวของ conical sheet ที่ประกอบด้วยขนาดของหยดหลายขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ ขณะที่หยดขนาดเล็กมากจะถูกผลึกเข้าไปยังตรงกลางของหน้าตัดสเปรย์จึงไม่เห็นผลของความดันฉีดชัดเจนอย่างมีนัยยะที่บริเวณนี้ นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความดันฉีดพบว่า $C_{v,k}$ มีค่าเพิ่มขึ้นที่ downstream ของ conical sheet ขณะที่ตำแหน่งอื่นมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม ข้อมูลนี้เป็นเพียงข้อมูลที่ระยะ $z = 10$ mm เท่านั้น ซึ่งมีตำแหน่งในแนวรัศมีน้อยเกินไปไม่สามารถเห็นผลกระทบของความดันฉีดต่อ pattern ของ $C_{v,k}$ ตามแนวรัศมีได้ จากผลงานวิจัยก่อนหน้า [19, 20] ของหัวฉีดความดันหมุนวนแบบหน้าตัดกรวยเต็ม ซึ่งสามารถนำมาอธิบายหัวฉีดสเปรย์หน้าตัดกรวยกลวงได้เช่นกัน คือ เมื่อ ΔP เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า $C_{v,k}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ด้านขอบนอกของหน้าตัดสเปรย์ในช่วงระยะ z หนึ่ง เนื่องมาจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของการไหลภายในหัวฉีดสูงขึ้น ความเร็วของ sheet สูงขึ้นทั้ง axial และ radial

5.2 สรุปการศึกษาคุณลักษณะของสเปรย์ไบโอดีเซลเพื่อเปรียบเทียบกับสเปรย์ของดีเซล

ผลการวัดในแนววิถี $f_v(D)$ ได้แสดงความแตกต่างระหว่างสเปรย์ของไบโอดีเซล 30 °C และดีเซล 30 °C เล็กน้อย โดยสเปรย์ของไบโอดีเซล 30 °C จะหยากกว่าเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของไบโอดีเซลเป็น 55 °C พบว่าการกระจายตัวของขนาดหยดเชิงปริมาตร $f_v(D)$ ใกล้เคียงกับของสเปรย์ดีเซลอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดที่ลดลง อย่างไรก็ตามผลในแนววิถีนี้ ไม่สามารถบอกได้ว่าโครงสร้างภายในสเปรย์เหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

จากการนำเทคนิคคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดเพื่อคำนวณหาการกระจายตัวของขนาดหยดและค่าความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ กับน้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยใช้หัวฉีดความดันหมุนวนประเภทหน้าตัดกรวยกลวง PLP มีรายละเอียดสำคัญที่สรุปได้ดังนี้

1) พิจารณานาขนาดหยด

1.1) เมื่อเปรียบเทียบสเปรย์ของไบโอดีเซลและดีเซลที่ 30 °C พบว่าสเปรย์ไบโอดีเซลหยากกว่าสเปรย์ดีเซลที่อุณหภูมิเดียวกันที่ 30 °C โดยเฉพาะบริเวณที่อยู่ระหว่างกึ่งกลางกับขอบของหน้าตัดสเปรย์ ซึ่งเป็นบริเวณ downstream ของการแตกตัวของ conical sheet ขณะที่บริเวณด้านในตรงกลางของหน้าตัดสเปรย์จะมีขนาดหยดใกล้เคียงกัน

1.2) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของไบโอดีเซลเป็น 55°C พบว่าสเปรย์มีขนาดหยดเล็กลง โดยเฉพาะบริเวณ downstream ของการแตกตัวของ conical sheet ทำให้สเปรย์ของไบโอดีเซลที่ 55°C มีความละเอียดใกล้เคียงกับของสเปรย์ดีเซล

1.3) เมื่อความดันฉีดเพิ่มขึ้น ทำให้ขนาดหยดเล็กลงบริเวณขอบของหน้าตัดสเปรย์ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความดันฉีดยังทำให้เห็นความแตกต่างของขนาดหยดน้อยลงในสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง นั่นคือ ผลกระทบของความหนืดจะน้อยลงเมื่อความดันฉีดเพิ่มขึ้น

2) พิจารณาความเข้มข้นเชิงปริมาตร ณ ตำแหน่งใดๆ $C_{v,k}$

2.1) ค่าของ $C_{v,k}$ ณ ตำแหน่งใดๆ ของน้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง มีความใกล้เคียงกันมาก แต่อย่างไรก็ตาม น้ำมันที่มีความหนืดน้อยกว่า จะมีแนวโน้มที่มีค่าสูงสุดของความเข้มข้นเลื่อนไปทางด้านขอบของสเปรย์มากกว่า เนื่องจากความหนืดน้อยกว่าทำให้เกิดการสูญเสียของการไหลภายในหัวฉีดน้อยและเกิดการไหลวนที่สร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางได้มากกว่า ส่งผลให้ conical sheet มีความเร็วในแนว radial มากขึ้น จึงเกิดการกระจายของหยดสเปรย์ไปทางขอบด้านนอกมากขึ้น

2.2) ค่าของ $C_{v,k}$ เพิ่มขึ้นตามแนวรัศมีของหน้าตัดสเปรย์ จนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง downstream ของการแตกตัวของ conical sheet จากนั้นจึงเริ่มมีค่าลดลงจนถึงขอบของสเปรย์ ผลที่ได้นี้คล้ายคลึงกับสเปรย์หน้าตัดกรวยเต็มเนื่องจากเป็นคุณลักษณะของหัวฉีดความดันหมุนวนเหมือนกัน เพียงแต่ค่า $C_{v,k}$ ไม่มีค่าเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าตัดกรวยเต็มเท่านั้น

2.3) เมื่อระยะ z เพิ่มขึ้น พบว่าค่า $C_{v,k}$ มีลักษณะที่กระจายแบบราบมากขึ้น โดยมีแนวโน้มลดลงตาม downstream เพราะพื้นที่หน้าตัดของสเปรย์มีขนาดใหญ่ขึ้น ยกเว้นที่กึ่งกลางสเปรย์ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจาก air entrainment ที่ผลผลิตขนาดเล็กมาก เข้ามายังกึ่งกลางสเปรย์มากขึ้นที่ downstream จนปรากฏค่า $C_{v,k}$ ไม่เท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสเปรย์กรณีของหัวฉีด PLP ที่ $z = 40 \text{ mm}$

2.4) ในกรณีที่เพิ่มความดันฉีดมากขึ้นจาก 7 bar จนถึง 13 bar พบว่าไม่เห็นความแตกต่างของค่า $C_{v,k}$ ระหว่างน้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่างจากการวัดบนหน้าตัดสเปรย์ที่ระยะ $z = 10 \text{ mm}$

2.5) กรวยกลวงของสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่างมีขนาดเล็กกว่ากรณีของน้ำ โดยพบว่าหน้าตัดสเปรย์ของน้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ไม่พบหยดที่ตำแหน่งกึ่งกลางหน้าตัด ($r_k = 0 \text{ mm}$) ที่ระยะ $z = 10 \text{ mm}$ เท่านั้น (เงื่อนไขทดสอบ $\Delta P = 10 \text{ bar}$ และ $z = 10, 20$ และ 30 mm) สาเหตุที่ไม่พบกรวยกลวงบนหน้าตัดสเปรย์น้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ระยะ $z = 20$ และ 30 mm เหมือนกับกรณีของสเปรย์น้ำ เป็นผลเนื่องมาจากความหนืดของน้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าสูงกว่าความหนืดของน้ำมาก ทำให้มีแรงเสียดทานของการไหลภายในหัวฉีดสูงกว่า การไหลวนจึงสร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางได้น้อยกว่า ส่งผลให้ความเร็วของ conical sheet ในทิศ radial น้อยลง การแตกตัวของ conical sheet จึงเกิดกรวยกลวงที่เล็กกว่าได้

สุดท้ายนี้จะเห็นว่าการใช้เทคนิคคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดร่วมกับการวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงเพื่อหาการกระจายตัวของขนาดหยด ณ ตำแหน่งใดๆ และความ

เข้มข้นเชิงปริมาตรนี้ มีประสิทธิภาพและมีประโยชน์อย่างมากต่อการศึกษาคุณลักษณะภายในของสเปร์ย์

5.3 ข้อเสนอแนะ

ควรรนำอัลกอริธึมของเทคนิคการคำนวณกลับด้วยวิธีเอนโทรปีสูงสุดที่ได้พัฒนาไปใช้ประโยชน์ต่อไปในการศึกษาและวิจัยทางด้านการแตกตัวและสเปร์ย์ ได้แก่ เพื่อการศึกษาคุณลักษณะของสเปร์ย์ที่มีโครงสร้างแบบต่างๆ จากหัวฉีดประเภทต่างๆ รวมถึงการออกแบบหัวฉีดประเภทต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Allen, C. A. W. and Watts, K.C. (1996). A batch type transesterification unit for biodiesel fuels, **CSAE Paper**, pp. 96-404.
- [2] P. Wibulswas (2001). Using vegetable oils in diesel engines. **Conference on research direction and development of biodiesel for commerce on 18 June 2001 at Maraui Garden Hotel**, Bangkok, Thailand.
- [3] Sriroth, K. (2002). Palm oil: the biodiesel hope of Thailand, **28th Congress on Science and Technology of Thailand on 24-26 October 2002 at Queen Sirikit National Convention Center**, Bangkok, Thailand.
- [4] M.S. Graboski and R.L. McCormick (1998). Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. **Progress in Energy Combustion and Science**, 24, pp. 125-164.
- [5] Wangwattana, S. (2001). The effects of using diesel fuel blended with vegetable oils on engine performance and environment, **Conference on research direction and development of biodiesel for commerce on 18 June 2001 at Maraui Garden Hotel**, Bangkok, Thailand.
- [6] Hemmerlein, M., Korte, V. and Richter, H. S. (1991). Performance, exhaust emission and durability of modern diesel engines running on rapeseed oil, **SAE Paper**, 910848.
- [7] Shumacher, L. (1999). Fueling used diesel engines with methyl-ester soybean oil. Soybean Research Documents Online, <http://stratsoy.ag.uiuc.edu/~stratsoy/research/usb9.html>, internet.
- [8] Altin, R., Cetinkaya, S. and Yucsesu, H. S. (2001). The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines. **Energy Conversion and Management**, 42, pp. 529-538.
- [9] Tashtoush, G., Al-Widyan, M. I. and Al-Shyoukh, A. O. (2003). Combustion performance and emissions of ethyl ester of a waste vegetable oil in a water-cooled furnace, **Applied Thermal Engineering**, 23, pp. 285-293.
- [10] Lee, S. W., Herage, T. and Young, B. (2004). Emission reduction potential from the combustion of soy methyl ester fuel blended with petroleum distillate fuel, **Fuel**, 83, pp. 1607-1613.
- [11] Carraretto, C., Macor, A., Mirandola, A., Stoppato, A. and Tonon, S. (2004). Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations, **Energy**, 29, pp. 2195–2211.

- [12] Allen, C. A. W. and Watts, K. C. (1998). Experimental analysis of biodiesel atomization characteristics, *Canadian Agricultural Engineering*, 40, pp. 281-285.
- [13] D. C. Hammond, Deconvolution Technique for the Line-of-Sight Optical Scattering Measurements in Axisymmetric Sprays. *Applied Optic*. 1981, 20, 493-499.
- [14] A. J. Yule, A. H. Seng, C. Felton, P. G. Ungut, A. Chigier, A Laser Tomographic Investigation of Liquid Fuel Sprays. Eighteenth Symposium (International) on Combustion. 1981, 1501-1510.
- [15] L. G. Dodge, D. J. Rhodes, R. D. Reitz, Drop-Size Measurement Techniques for Spays: Comparison of Malvern Laser-Diffraction and Aerometrics Phase/Doppler. *Applied Optics*, 1987, 26, 2144-2154.
- [16] J. A. Drallmeier, J. E. Peters, Liquid- and Vapor-Phase Dynamics of a Solid-Cone Pressure Swirl Atomizer. *Atomization and Sprays*. 1994, 4, 135-158.
- [17] S. Boyaval, C. Dumouchel, Deconvolution Technique to Determine Local Spray Drop Size Distributions - Application to High-Pressure Swirl Atomizers. ILASS-Europe, Zurich Switzerland. 2001.
- [18] K. Lee, R. D. Reitz, Investigation of Spray Characteristics from a Low-Pressure Common Rail Injector for Use in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine. *Measurement Science and Technology*. 2004, 15, 509-519.
- [19] P. Yongyingsakthavorn, P. Vallikul, B. Fungtammasan, C. Dumouchel, Application of the Maximum Entropy Technique in Tomographic Reconstruction from Laser Diffraction Data to Determine Local Spray Drop Size Distribution. *Experiments in Fluids*. 2007, 42 (3), 471-481.
- [20] P. Yongyingsakthavorn, C. Dumouchel, P. Vallikul, and B. Fungtammasan, Deconvolution with Maximum Entropy Solution to Determine Local Extinction Coefficient and Local Volume Concentration from Laser Diffraction Data. Part. Part. Syst. Charact., 2009, 26, 187-198.
- [21] Spray Patterns, [ออนไลน์], \ จาก <http://www.monarchnozzles.com>, 2554 [สืบค้นวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2556].
- [22] Poojitganont, T., "Experimental Study of Atomization of Diesel Fuel using LDA Technique", Master thesis, King mongkut's Institute of technology north Bangkok, (2003).
- [23] Lefebvre, A. H. (1989). **Atomization and Sprays**, Hemisphere Publishing Corp.

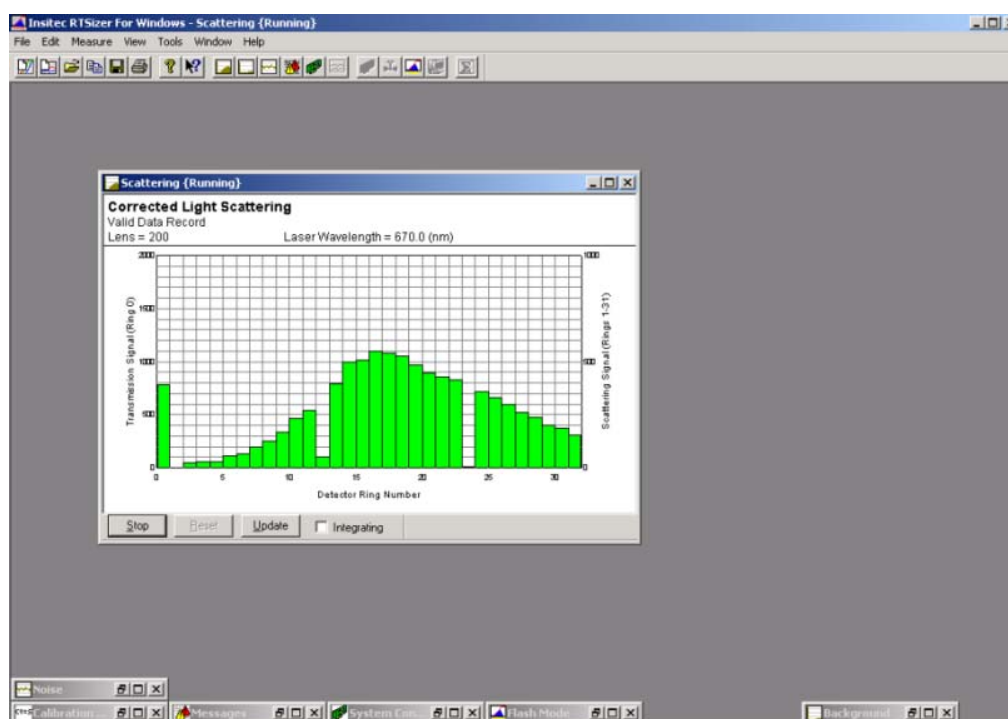
ภาคผนวก

ก. ปัญหาและอุปสรรค

1 หั้วฉีดแบบกรวยกลวง มีขายในประเทศไทยเพียงบางประเภทและบางขนาด (GPH) รวมถึงราคาแพง ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการติดต่อสั่งซื้อจากต่างประเทศ ซึ่งทำให้งานล่าช้า

2 ถึงความดันสำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาแพงมาก ประมาณ 30,000 บาท แม้ว่าจะสอบถามทางบริษัทที่เคยรับจ้างทำ ทางผู้วิจัยจึงได้หาบริษัทรับจ้างทำที่หาเศษท่อมาใช้ทำถึงความดันเพื่อให้มีราคาถูก

3 เครื่องมือวัดเลเซอร์มีปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณวัดขาดหายในบางไดโอด ทำให้ผลที่วิเคราะห์ไม่สามารถหาข้อสรุปได้ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ต้องทำการซ่อมและทำการวัดใหม่ทั้งหมด ทำให้งานล่าช้า



4 ผลการทำ Tomographic Reconstruction พบว่าไม่เจอกรวยกลวงบริเวณตรงกลางของสเปร์ย์ที่ตำแหน่ง 30 50 และ 70 มิลลิเมตร ห่างจากหัวฉีด จึงได้พยายามตรวจหาสาเหตุพบว่าตำแหน่งที่เกิดกรวยกลวงอยู่ใกล้กับหัวฉีดน้อยกว่า 30 มิลลิเมตร และขนาดเลเซอร์ของเครื่องมือวัด Malvern Spraytec (10 มิลลิเมตร) มีขนาดใหญ่เกินไป ทำให้ต้องลดขนาดเลเซอร์ลงเหลือ 3.33 มิลลิเมตร โดยใช้อุปกรณ์เลนส์ช่วย ซึ่งตำแหน่งการวัดต่างๆ ได้เปลี่ยนไปจากเดิมโดยสิ้นเชิง และต้องทำการทดลองใหม่ทั้งหมด

อย่างไรก็ตามนักวิจัยได้สามารถแก้ปัญหาต่างๆ และทำงานวิจัยได้สำเร็จตามเป้าหมาย แม้จะล่าช้าไปบ้างก็ตาม

ข. Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

TSF019

The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering
17-19th December 2014, The Empress, Chiang Mai



Characterization of Hollow-Cone Water Spray by Using the Maximum Entropy Reconstruction

T. Sangjun^{1,*}, P. Yongyingsakthavorn¹ and P. Vallikul¹

¹ Department of Mechanical and Aerospace Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800
*Corresponding Author: teerapun.sj@gmail.com

Abstract

This work is to characterize the hollow-cone water spray by using the developed maximum-entropy tomography technique. The injector is a pressure-swirl atomizer which the axisymmetrical spray can be assumed. Measurements by laser diffraction technique are carried out at several radial positions ranging from the center to the outskirts of the spray for a few working injection pressures. The laser diffraction technique measures forward scattered light intensity and extinction coefficient to calculate line-of-sight drop-size distribution and volume concentration of the spray. The tomographic reconstruction with the maximum entropy solution method is applied on the line-of-sight scattered light intensities and extinction coefficients to obtain the local ones. It is found that the bigger drops are in the outer region whereas smaller drops are in the inner region, similar to a solid-cone spray. However, the difference is appearance of the free-drop region at the center core of the hollow-cone spray, where the volume concentration equals zero. The reconstructed local volume concentration can be validated through this free-drop region at the center.

Keywords: laser diffraction, tomographic reconstruction, maximum entropy, hollow-cone spray

1. Introduction

In combustion process, atomization is an important first step. Atomization of liquid fuel into small droplets is required prior to combustion to obtain high combustion efficiency and low emissions. To characterize spray drop size distribution, laser diffraction is one powerful method due to user-friendly and fast measurement. However, the measured data is line-of-sight and the local information could not be known [1].

Regarding the limitations mentioned above, the previous publications [2, 3] have presented a technique to determine the local drop-size distribution and local volume concentration of the spray from the laser diffraction data. However, there are some important points of work that have not been fulfilled yet. First, the tomographic reconstruction algorithms were developed on the axisymmetrical sprays only with solid-cone shape. For an axisymmetrical spray with hollow-cone shape, the performance of the reconstruction algorithms

TSF019

has not been presented yet. Second, performing reconstruction on the hollow-cone spray pattern would help to validate the local concentration, obtained from the ME technique, at the center part of the spray where there are no drops. This is an interesting task to fulfill the ME reconstruction technique developed by Yongyingsakthavorn et al. [2, 3].

In this paper, the objective is an attempt to validate the local concentration calculated from the developed maximum entropy tomographic reconstruction technique by employing the hollow-cone pressure swirl atomizer.

2. Tomography Problem Formation

2.1 Laser Diffraction Technique

Drop size distributions can be determined by Laser Diffraction technique based on Fraunhofer diffraction theory. A Malvern Spraytec is laser diffraction drop size analyzer for high velocity spray, also accounting light energy distribution of forward refraction through small particles apart from that of forward diffraction. The discrete form of the relationship between scattering light and volumetric particle size distribution is given by [4]

$$I(\theta) = C_X V(D) \quad (1)$$

where $I(\theta)$ is the measured scattered light on a 31-diode detector (Fig. 1), C is an instrument transfer function, $V(D)$ is volume fraction equivalent to probability distribution and D is drop diameter. The volume-based drop size distribution, $V(D)$, is determined by using model independent,

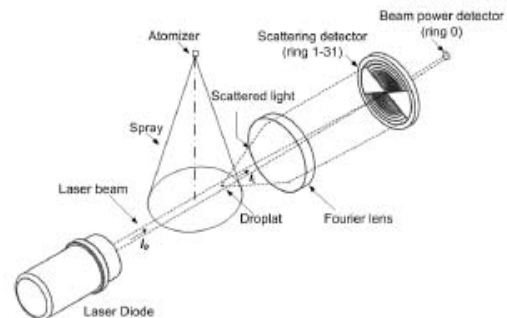


Fig. 1: The light diffraction optical system.

2.2 Drop size distribution

The reconstruction for an axisymmetrical spray is applied to line-of-sight scattered light intensity distribution $\bar{I}_j(y_i)$ on the j^{th} diode of the detector. For a particular diode j , the measured line-of-sight intensities obtained from a scan of N measurements at the same axial position from the nozzle are used to reconstruct N local scattered light intensities per unit path length, $I_j(r_{k=1...N})$, on the diode, see Fig. 2.

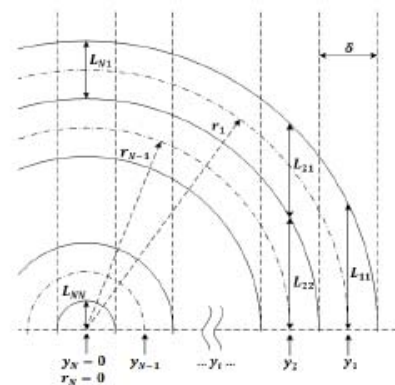


Fig. 2: Division of the spray cross-section into concentric annular rings.

TSF019

The relationship between the path-integrated and local light intensities of any diode j is:

$$\bar{I}_j(y_j) = 2 \sum_{k=1}^j L_{jk} I_j(r_k) \quad , i = 1 \text{ to } N \quad (2)$$

where L_{jk} is the path length given by

$$L_{jk} = \sqrt{\left(r_k + \frac{\delta}{2}\right)^2 - r_j^2} - \sum_{m=k+1}^j L_{jm} \quad (3)$$

Eq. (1) is solved for $I(r_k)$ using the technique of Maximum Entropy (ME) with Bevensee's iterative algorithm (see [2, 5]). Then, the local volume-based drop size distribution at any r_k is determined by the local intensities on all diodes.

2.3 Volume Concentration

To determine the local volume concentration, the same deconvolution procedure is carried out but the tomographic reconstruction will be applied on line-of-sight extinction coefficient instead of scattered light intensities. However, the Malvern Spraytec provides the transmission, which is calculated from the measured intensities of the undiffracted light I_L and the incident light I_0 :

$$T = \frac{I_L}{I_0} \quad (4)$$

From Beer-Lambert law,

$$I_L = I_0 e^{-\int_L K(s) ds} \quad (5)$$

where $K(s)$ is the extinction coefficient per unit path length, s is the curvilinear coordinate along the laser beam, and L is the optical path length.

From Eqs. (4) and (5), the transmission is then related to the extinction coefficient $K(s)$ as:

$$-\ln T = -\ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right) = \int_L K(s) ds = KL = \bar{K} \quad (6)$$

Therefore, each measurement in Fig. 1 can report line-of-sight extinction coefficients. The reconstruction is applied on these N coefficients. They are calculated from the measured line-of-sight transmissions T by using Eq. (6). The relationship between the path-integrated and local extinction coefficients is:

$$\bar{K}(y_j) = 2 \sum_{k=1}^j L_{jk} K(r_k) \quad j = 1 \text{ to } N \quad (7)$$

where L_{jk} is the path length (see eq. (3)). Eq. (7) is solved for $K(r_k)$ using the technique of Maximum Entropy (ME) as well.

Finally, the local volume concentrations $C_{v,k}$ are determined from the local information of $K(r_k)$, and the local Sauter mean diameter, $D_{32,k}$, by using the equation given by:

$$C_{v,k} = \frac{2D_{32,k}K(r_k)}{3\bar{Q}_k} \quad (8)$$

where $\bar{Q}$ is the mean scattering coefficient (see more detail in [3, 6]).

3. Experimental system and setup

In experiment, water is a working fluid and is injected vertically into still air by compressed nitrogen gas (see Fig.3). The water flows with constant pressure and a needle valve is used to

TSF019

control different flow rates at the desired pressures. The injector used is the Monarch pressure swirl atomizer with hollow-cone spray section (PLP model) where axi-symmetrical spray can be assumed. The size of the injector is 2.25 GPH.

The commercial laser diffraction instrument, named Malvern Spraytec, is employed to measure line-of-sight scattered light intensity and transmission. These measured data are required for calculation of the line-of-sight spray drop-size distribution and line-of-sight volume concentration by using Mie's theory and transmittance theory, respectively, as mentioned in the prior section. The diameter of the laser beam is 10 mm. The 200-mm Fourier lens for the drop-size range of $3.8 - 462.54 \mu\text{m}$ is selected. The data acquisition rate is set at 1250 Hz for 1 s, which gives 1250 records of the drop-size distributions for each measurement.

Measurement is carried out from the center to the edge of the spray on the 3 spray sections, which are at 30, 50, and 70 mm away from nozzle as shown in Fig. 4. The test injection pressures are 10, 12 and 14 bars.

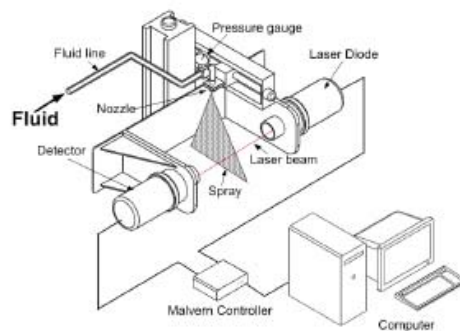


Fig. 3: Schematic diagram of drop size measurement system

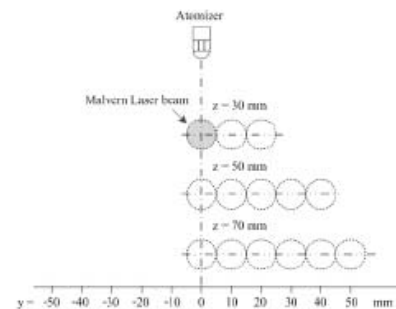


Fig. 4: laser scanning for deconvolution

4. Results

By the deconvolution procedure in the section 2.2, the local drop size distributions are obtained as the example shows in Fig. 5. Figs. 6a) and 6b) present the local Sauter Mean Diameter (SMD or D_{32}) for different injection pressures and different spray sections, respectively. It is found that the smaller drops are at the inner region of the spray section whereas the larger drops are at the outer. The size of the droplets tends to decrease as the pressure increases (Fig. 6a)). As distance away from nozzle increases, the size of the droplets also tends to increase.

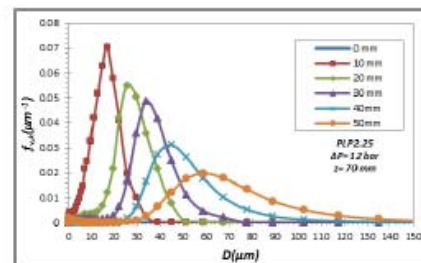


Fig. 5: Local drop-size distributions ($\Delta P_i = 12 \text{ bars } z = 70 \text{ mm}$)

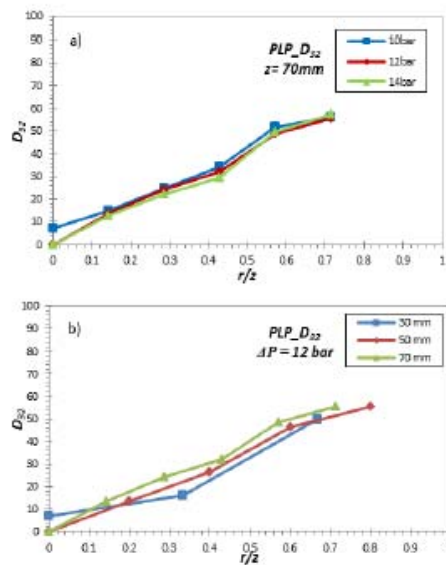


Fig. 6: local Sauter mean diameter D_{32}

a) at different injection pressures ($z = 70$ mm),
and b) at different downstream distance ($\Delta P_i = 12$
bars)

These phenomena are identical to the case of solid-cone spray as found in the previous work [2]. However, the free-drop region is presented at the center core of the hollow-cone spray, particularly at the higher injection pressure and at the section further in downstream.

Fig. 7a) and 7b) shows the local extinction coefficients $K(r_k)$ calculated by the tomographic reconstruction procedure as described in the section 2.3. When injection pressure increases, the volume concentration tends to increase at the outer region and decrease at the center (Fig. 7a)). In Fig. 7b), the local extinction coefficient is approaching zero only in the case of $z = 70$ mm. This would be the reason that the laser beam

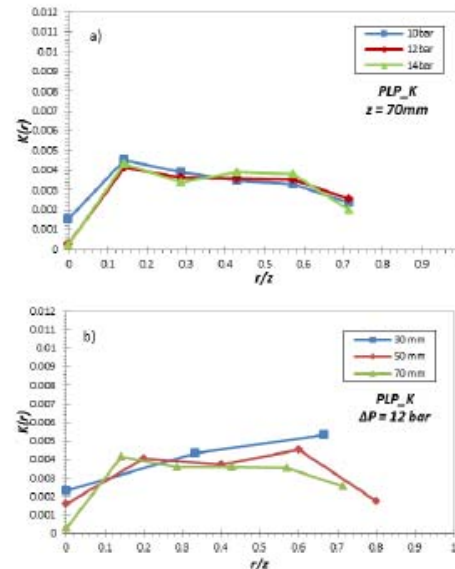


Fig. 7: local extinction coefficient $K(r_k)$. a) at
different injection pressures ($z = 70$ mm), and b)
at different downstream distance ($\Delta P_i = 12$ bars)

diameter is too large to investigate the free-drop region at the spray sections, $z = 30$ and 50 mm.

Lastly, The local volume concentrations ($C_{v,k}$) are calculated from the local Sauter mean diameter and the local extinction coefficients by Eqs. 8. The results in Fig. 8a) show that the concentration tends to be increased at the outer edge and reduced at the inner region when injection pressure is increased. The zero volume concentration or free-drop region is found at the center core of the spray in the cases of injection pressure equal to 12 and 14 bars and distance away from nozzle equal to 50 and 70 mm. This results well present validation of the reconstructed

TSF019

volume concentration at the center core of the spray obtained from the developed ME deconvolution technique.

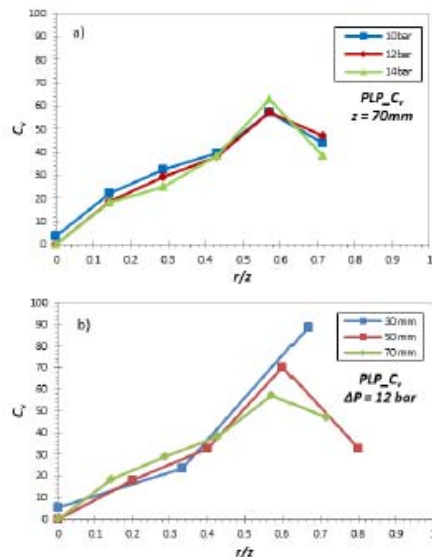


Fig. 8: local volume concentration $C_{v,k}$. a) at different injection pressures ($z = 70 \text{ mm}$), and b) at different downstream distance ($\Delta P_i = 12 \text{ bars}$)

5. Conclusion

This work has presented a part of application of the developed ME tomographic reconstruction technique to characterize the hollow-cone water spray. The validation of local volume concentration that has not been done yet in the previous work shows good result. The local volume concentration is found to be zero at the center core of the spray section, which means there are no drops in this region and it is reasonable for this spray pattern.

6. Acknowledgment

The authors would like to thank to the Department of Mechanical and Aerospace Engineering at KMUTNB for facilities, to graduate college at KMUTNB and the Thailand Research Fund (TRF) for financial support.

7. References

- [1] J.D.J. Ingle, S.R. Crouch, Spectrochemical Analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1988.
- [2] P. Yongyingsakthavorn, P. Vallikul, B. Fungtammasn, C. Dumouchel, Application of the Maximum Entropy Technique in Tomographic Reconstruction from Laser Diffraction Data to Determine Local Spray Drop size Distribution. Exp. Fluids 2007, 42, 471-481.
- [3] P. Yongyingsakthavorn, C. Dumouchel, P. Vallikul, B. Fungtammasn, Deconvolution with Maximum Entropy Solution to Determine Local Extinction Coefficient and Local Volume Concentration Values from Laser Diffraction Data. Part. Syst. Charact. 26(2009), 187-198.
- [4] Malvern/INSECTEC: EPCS Technical Specification Revision 12.1.98.2.
- [5] R.M. Bevensee, Maximum Entropy Solutions to Scientific Problems. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992.
- [6] R.A. Dobbins, G.S. Jizmagian, Optical Scattering Cross Sections for Polydispersions of Dielectric Spheres. J. Opt. Soc. Am. 1966, 56, 1345-1350.

หมายเหตุ: ผลงานวิจัยที่น่าเสนอนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย แต่ไม่ได้เขียนผลในส่วนนี้ลงในรายงานเนื่องจากได้ทำการออกแบบการทดลองใหม่ที่ดีกว่า จึงได้นำผลที่ดีกว่าเขียนลงในรายงานเล่มนี้ และผลงานวิจัยที่ได้เขียนลงในเล่มนี้จะถูกเขียนเป็นวารสารเพื่อเผยแพร่ต่อไป