



บทที่ 4

ผลการวิจัย

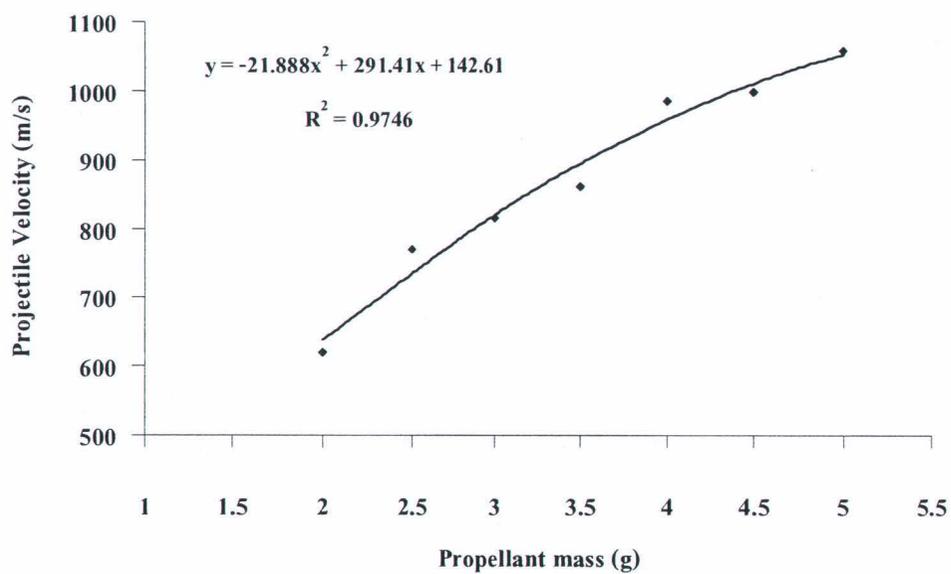
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการทดลองทั้งหมดเริ่มจากการปรับเทียบปริมาณดินปืนกับความเร็วยิงของลูกปืนและลำพุ่งเชื้อเพลิงด้วยวิธีหลักการตัดแสงเลเซอร์ (Laser beam interruption) นอกจากนี้ยังได้ถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของลูกปืน ลำพุ่งความเร็วสูงของเชื้อเพลิงหลายชนิด กับหัวฉีดที่มีลักษณะหลายแบบ ที่อุณหภูมิของทดสอบและอุณหภูมิต่างๆ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (High speed video camera) ซึ่งสามารถถ่ายภาพด้วยความเร็วได้สูงสุดถึง 1,000,000 fps เพื่อศึกษาพฤติกรรมและวัดความเร็วของลูกปืนและลำพุ่งขณะเคลื่อนที่ในห้องทดสอบ

4.1 ปริมาณดินปืนกับความเร็วยิงของลูกปืนและลำพุ่ง

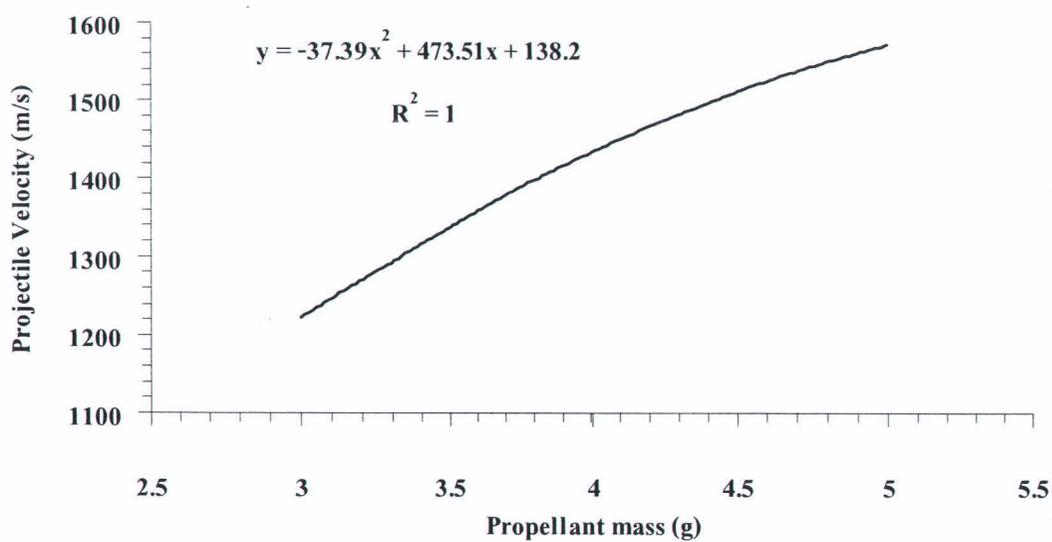
เมื่อทำการเก็บข้อมูล โดยวัดความเร็วของลูกปืนที่เปลี่ยนไปกับปริมาณของดินปืนที่เติมแต่ละครั้งในการยิง เริ่มตั้งแต่ 2-7 g จากดินปืนไร้ควัน (smokeless powder) และดินปืนดำ (Black powder) พบว่าดินปืนจะสามารถทำการขับเคลื่อนลูกปืนได้ต้องใช้ ดินปืนปริมาณ 2 g ขึ้นไปหากน้อยกว่านั้นไม่สามารถขับเคลื่อนลูกปืนได้ ทั้งนี้ท่อบรรจุดินปืนสามารถบรรจุดินปืนได้สูงสุด 7 g ในช่วงที่ทำการศึกษา

จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณดินปืนชนิดดินปืนดำกับความเร็วของลูกปืน (Muzzle speed) รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลูกปืนจาก HDPE น้ำหนัก 0.78 g ของแท่งบรรจุดินปืน (cartridge) ขนาด 5 g กับดินปืนดินปืนไร้ควันจาก 3 – 5 g นอกจากนี้ยังหาความสัมพันธ์ของความเร็วของลูกปืน มวลของดินปืน, มวลของลูกปืนดังรูปที่ 4.3 จากรูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของปริมาณดินปืนชนิดดินปืนดำ กับความเร็วของลูกปืน (Muzzle speed) จากปริมาณดินปืน 2 – 5 g พบว่าความเร็วของลูกปืนมีความเร็วต่ำสุดที่ปริมาณดินปืน 2 g ที่ความเร็วประมาณ 600 m/s และความเร็วของลูกปืนมีความเร็วสูงสุดที่ปริมาณดินปืน 5 g ประมาณ 1,000 m/s

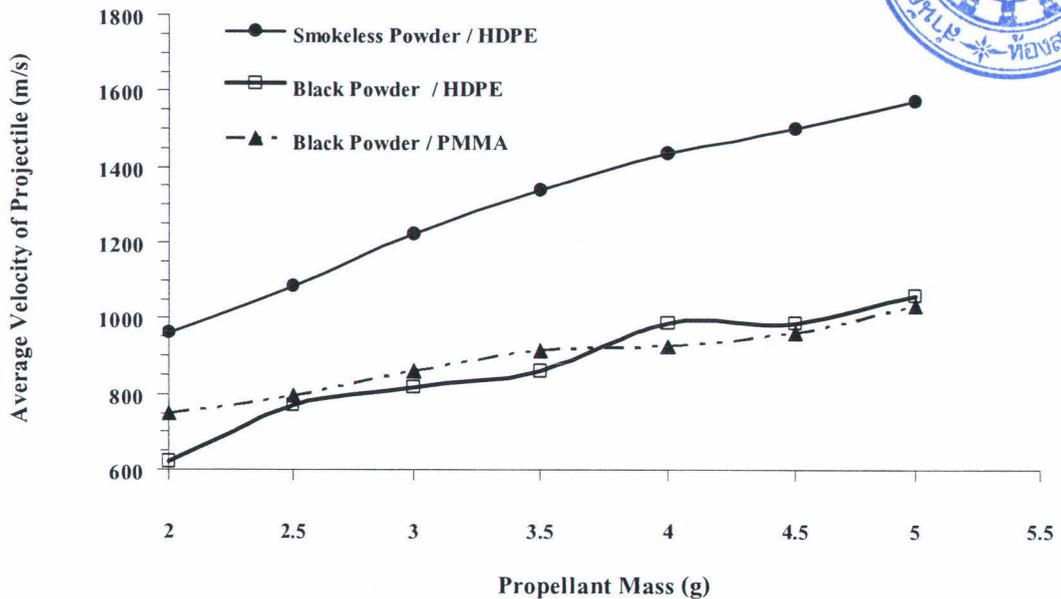
จากรูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของปริมาณดินปืนชนิดไร้ควันกับความเร็วของลูกปืน (Muzzle speed) จากปริมาณดินปืน 3 – 5 g พบว่าความเร็วของลูกปืนมีความเร็วต่ำสุดที่ปริมาณดินปืน 3 g ที่ความเร็วประมาณ 1,200 m/s และความเร็วของลูกปืนมีความเร็วสูงสุดที่ปริมาณดินปืน 5 g ประมาณ 1,600 m/s จากรูปที่ 4.1 กับ 4.2 ชนิดของดินปืนดำกับไร้ควัน ซึ่งจะเห็นว่าดินปืนแบบไร้ควันจะทำให้ความเร็วของลูกปืนมากที่สุดที่ทุกๆ ปริมาณดินปืน



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลดินปืนดำ (Black powder) กับ ความเร็วลูกปืน



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลดินปืนไรค์ควัน (Smokeless powder) กับ ความเร็ว ลูกปืน



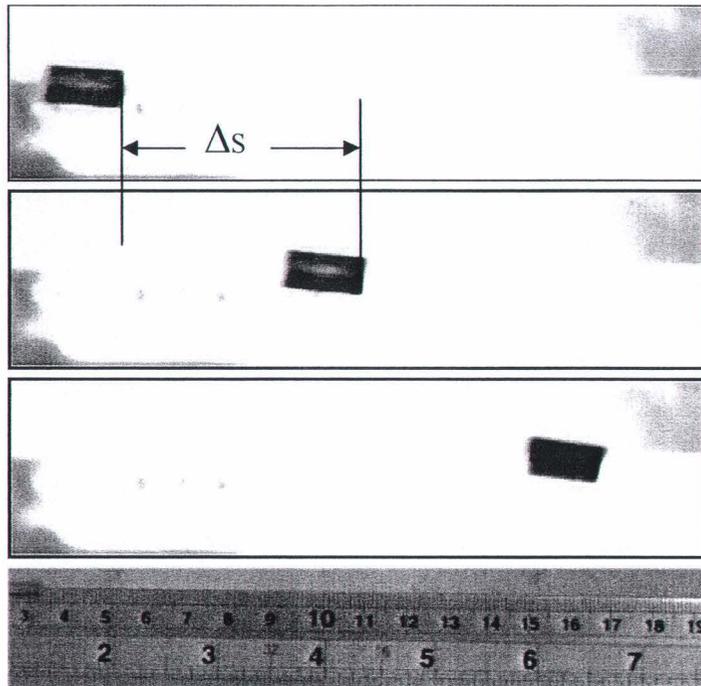
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลดินปืนต่างชนิด กับความเร็วลูกปืน ที่ทำจาก HDPE กับ PMMA (มวลต่างกัน)

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลดินปืนไร้ควัน (Smokeless powder) กับความเร็วลูกปืนของลูกปืนที่ทำจาก HDPE ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ความยาว 15 mm มวล 0.78 g กับ PMMA มวล 0.92 g ที่ขนาดเดียวกันกับ HDPE พบว่าความเร็วของลูกปืนต่างชนิดกันแต่ดินปืนชนิดกันมีความเร็วไม่แตกต่างกันมาก แต่ชนิดของดินปืนจะมีผลต่อความเร็วของลูกปืนมากกว่าอย่างชัดเจน

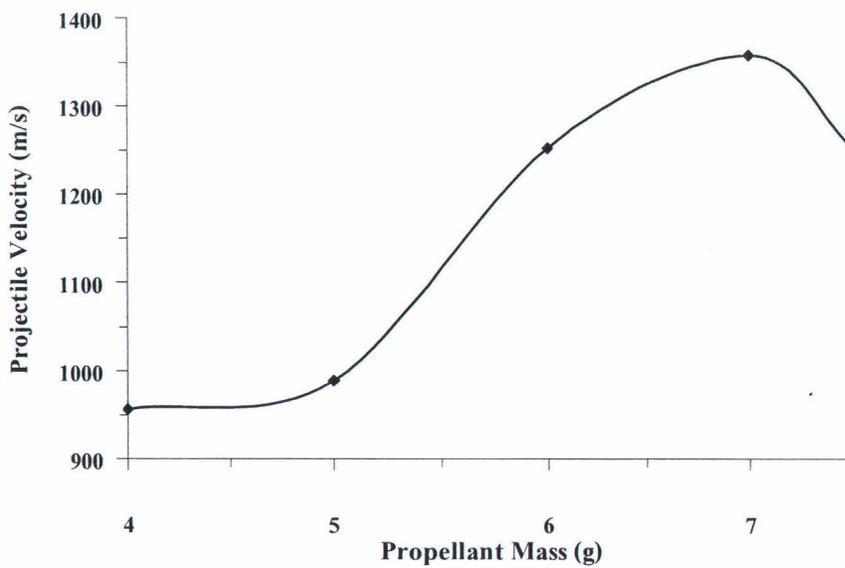
ความเร็วของลูกปืนที่วัดได้จากหลักการตัดแสงเลเซอร์ จะถูกวัดเทียบกับความเร็วที่วัดได้จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 4.4

จากการทดลองทดลองเบื้องต้นพบว่าความเร็วของลูกปืนจากดินปืนไร้ควัน มีความเร็วที่สูงกว่าแบบดินปืนดำ และความเร็วของลูกปืนจะเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มปริมาณดินปืน จึงทำการทดลองโดยใช้ PMMA เป็นลูกปืนและดินปืนแบบไร้ควัน ทำการทดลองตั้งแต่ 4 -7.5 g ดังผลการทดลองในรูปที่ 4.5

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าความเร็วสูงสุดของลูกปืนจะค่าประมาณ 1,200 m/s ที่ปริมาณดินปืน 7 g และต่ำสุดประมาณ 900 m/s ที่ปริมาณดินปืน 4 g เมื่อเพิ่มปริมาณดินปืนขึ้นอีก ความเร็วของลูกปืนจะลดลง ซึ่งปริมาณดินปืนมากเกินไปทำให้พื้นที่ในห้องเผาไหม้เหลือน้อย ดินปืนเผาไหม้ไม่ทัน



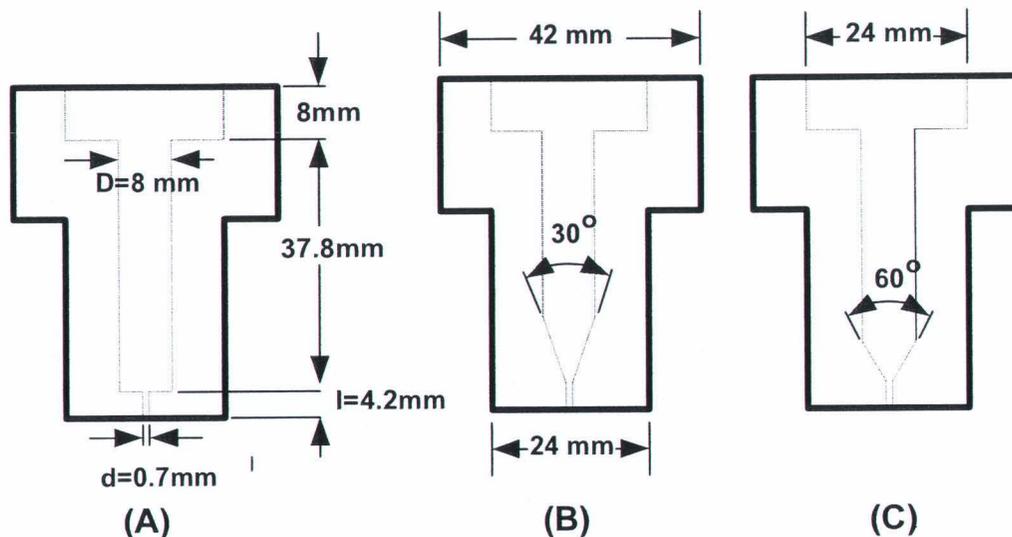
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายการเคลื่อนที่ของลูกปืน จากกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง $66.67 \mu\text{s}$ ต่อภาพ, ดินปืนชนิด
ดินดำ, หนัก 3 g



รูปที่ 4.5 ความเร็วของลูกปืนที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงดินปืน

4.2 ปริมาณดินปืนและรูปทรงของหัวฉีดกับความเร็วยิงของลำพุ่ง

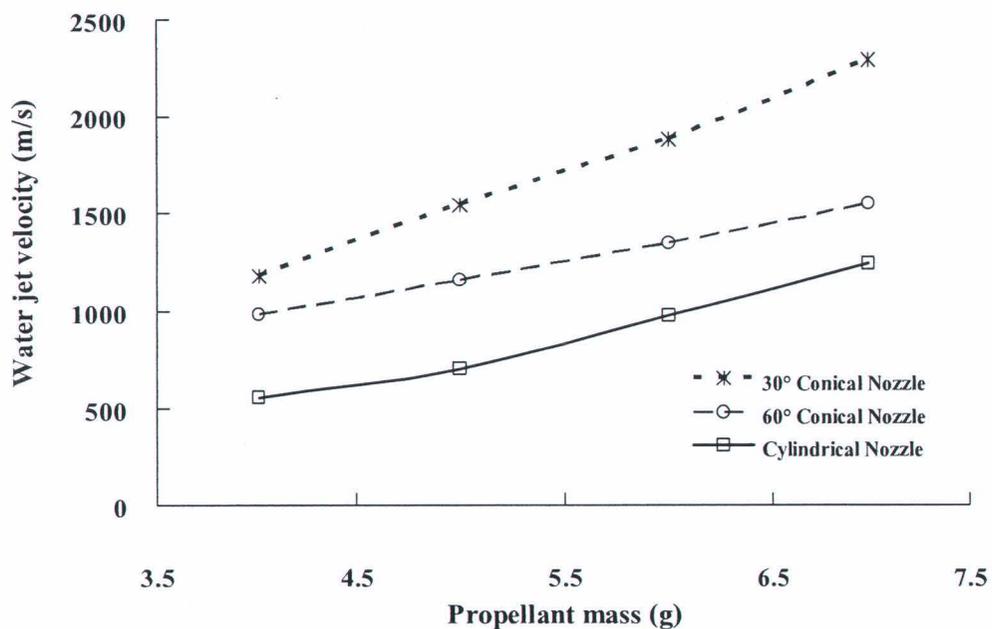
การทดลองในเบื้องต้นเพื่อหาความเร็วของลำพุ่งจะใช้วิธีการทั้งการตัดเล็ชเชอร์ และ กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง โดยการวัดความเร็วของลำพุ่งจะทดสอบกับหัวฉีด 3 รูปทรงดังรูป 4.6 และ ปริมาณดินปืน ที่ 4-7 g



รูปที่ 4.6 รูปทรงของหัวฉีด (A) ทรงกระบอก (B) แบบกรวยมุม 30° และ (C) แบบกรวยมุม 60°

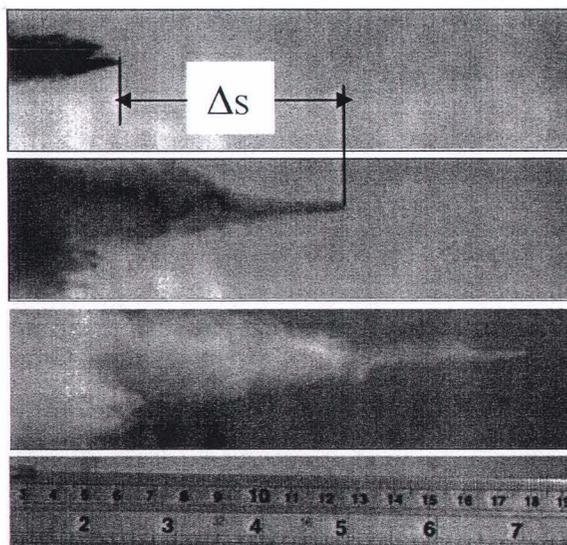
จากผลการทดลองที่ความเร็วของลูกปืน (956 – 1,358) ที่ได้จากมวลของดินปืนชนิดไร้ควัน ที่ 4-7 g ใช้ปริมาณดินปืน 7 g ที่ให้ลูกปืนมีความเร็วสูงสุด (1,358 m/s Vp) ทำการทดลองหาความเร็วของลำพุ่งน้ำจากหัวฉีดรูปร่างต่างๆ เพื่อให้ได้ค่าความเร็วสูงสุดของลำพุ่ง ดังรูปที่ 4.7 ผลของความเร็วของลำพุ่งน้ำที่เกิดจากหัวฉีด 3 รูปร่างคือ แบบกรวยมุม 30° และ 60° และ ทรงกระบอก (cylindrical nozzle) กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินปืน

จากรูปที่ 4.7 พบว่า ความเร็วของลำพุ่งน้ำสูงสุดที่ ประมาณ 2,200 m/s จากหัวฉีดแบบกรวยมุมภายใน 30° ส่วนความเร็วสูงสุดของลำพุ่งน้ำจากหัวฉีดแบบกรวยที่มีมุมภายใน 60° และ หัวฉีดทรงกระบอกมีความเร็ว 1,549 m/s และ 1,241 m/s ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 The effect of nozzle shape and propellant mass on water jet velocities

ความเร็วของลำพุ่งของน้ำที่วัดได้จากหลักการตัดแสงเลเซอร์ จะถูกวัดเทียบกับความเร็วที่วัดได้จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย การเคลื่อนที่ของลำพุ่งของน้ำจากกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง

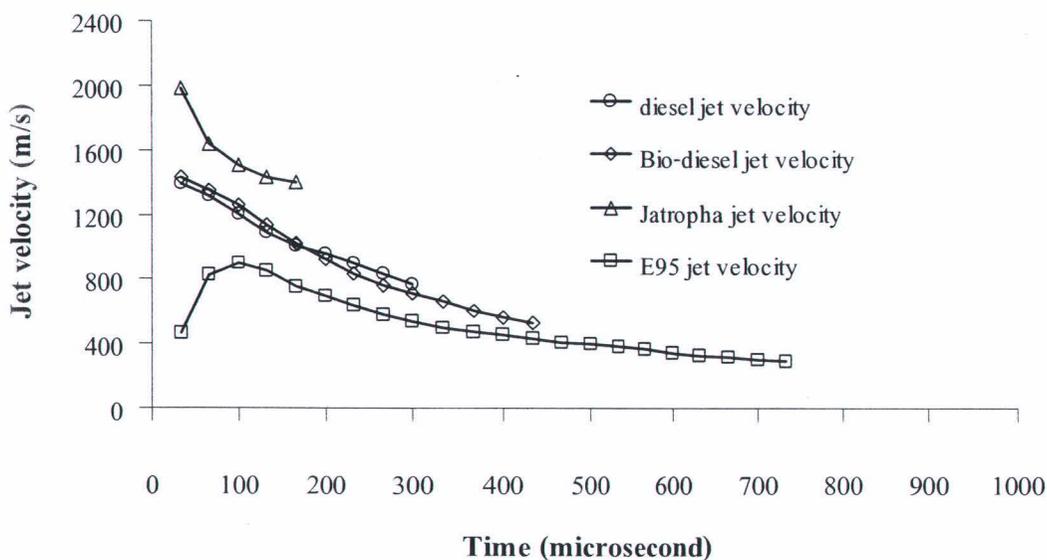
จากรูปที่ 4.8 เมื่อทำการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง ที่ความเร็ว 15,000 fps พบการเคลื่อนที่ของลำพ่นน้ำ โดยเวลาของแต่ละภาพใช้ห่างกัน $66.7 \mu\text{s}$ ระยะห่างของลำพ่นวัดได้ตามภาพ โดยเทียบกับความยาวไม้บรรทัด ที่ติดตั้งก่อนทำการถ่าย ซึ่งจากรูปทำการคำนวณพบว่าความเร็วพบว่าความเร็วเฉลี่ยของลำพ่นประมาณ $1,350 \text{ m/s}$ จากความเร็วลูกปืนที่วัดได้ในตอนต้น 833 m/s ซึ่งใกล้เคียงกับการวัดด้วยวิธีหลักการตัดแสงมาก

ต่อจากนี้ผลการทดลองจะใช้หัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอขวด (orifice (d) 0.7 mm มุมภายใน (α) 30° ความยาว orifice (l) 3.0 mm และอัตราส่วนของความยาว orifice ต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง orifice (l/d) เป็น 4.2 mm ปริมาณดินปืน 3 g

4.3 คุณลักษณะของลำพ่นความเร็วสูง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการทดลองด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับ Z-type shadowgraph system ของเชื้อเพลิงเหลวหลายชนิด ในสภาวะของห้องทดสอบที่แตกต่างกันทางอุณหภูมิ และความดัน และหัวฉีดที่มีรูปร่างต่างกัน เพื่อหาคุณลักษณะของของเหลวที่ถูกฉีดด้วยความเร็วสูง โดยเน้นให้ลำพ่นเชื้อเพลิงความเร็วสูงมีความเร็วสูงกว่าความเร็วของเชื้อเพลิงที่ฉีดในปัจจุบันเล็กน้อย (ประมาณ 700 m/s)

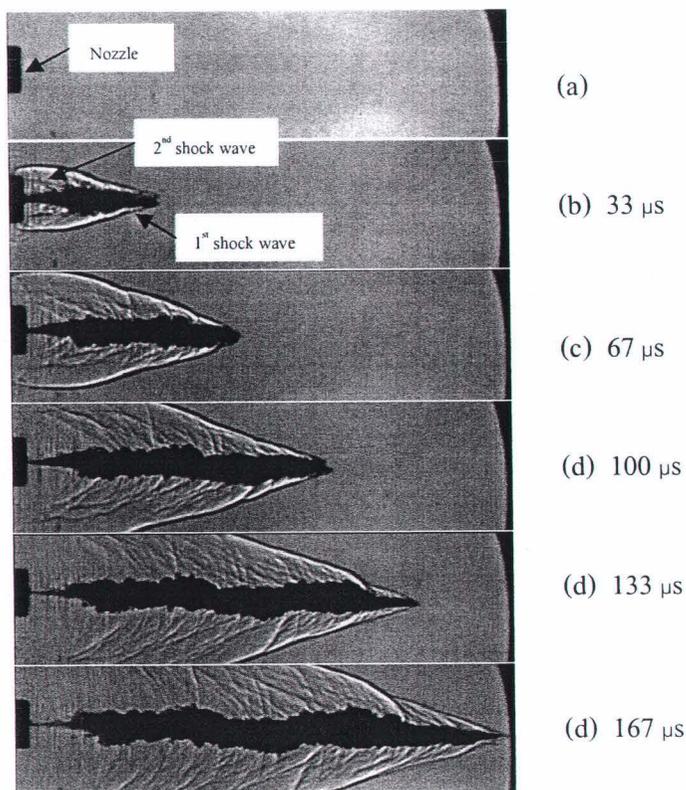
4.3.1 ผลของความเร็วของลำพ่นเชื้อเพลิงต่างๆ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ (30°C) และความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.9 Comparison of fuel jets velocity

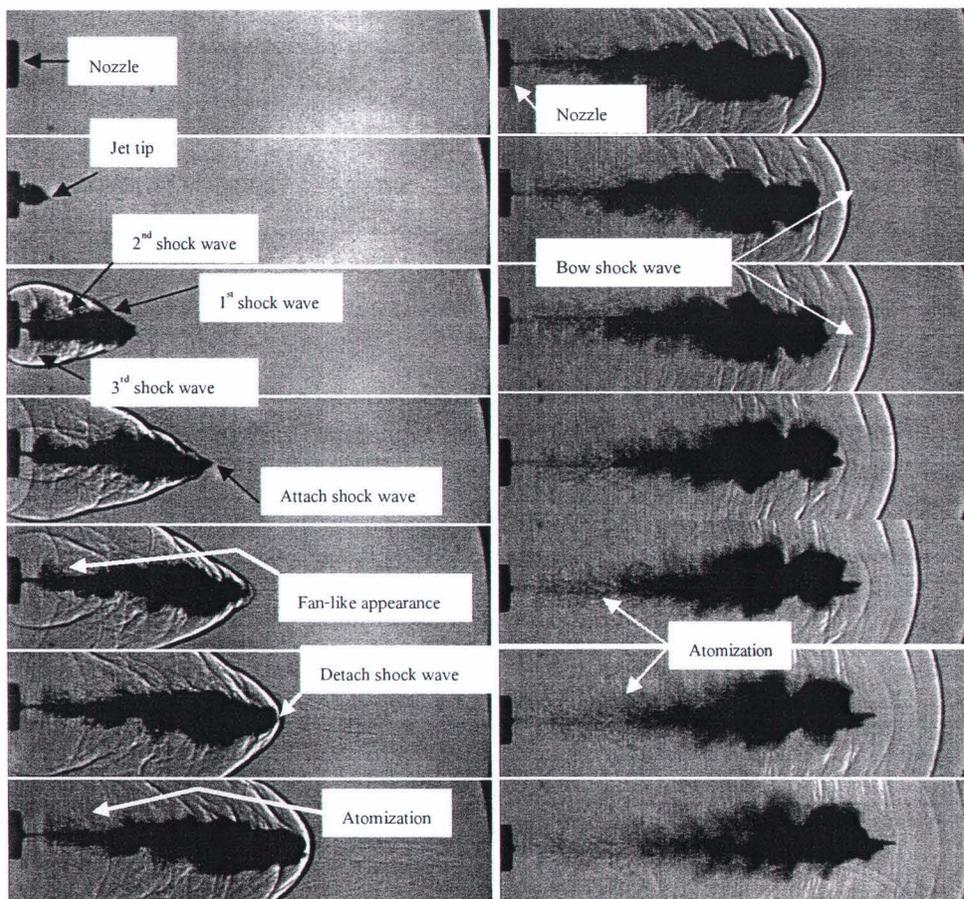
จากรูปที่ 4.9 เปรียบเทียบผลของความเร็วของลำพุ่งเชื้อเพลิง 4 ชนิด คือ ดีเซล (Diesel) ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว (bio-diesel) สนูปดำ (jatropha curcas oil) และ E95 (ethanol 95%) โดยใช้หัวฉีดขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางคอขวด (d) 0.7 mm มุมภายใน (α) 30 ° ความยาว orifice (l) 3.0 mm และอัตราส่วนของความยาว orifice ต่อ เส้นผ่านศูนย์กลางคอขวด (l/d) เป็น 4.2 mm ปริมาณดินปืน 3 g โดยภาพถ่ายกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงร่วมกับ Z-type shadowgraph system ดังรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.10

ผลการทดลองพบว่าลำพุ่งของน้ำมันเชื้อเพลิงจากสนูปดำมีความเร็วสูงที่สุด ($\sim 2,000$ m/s) ทำให้เส้นกราฟข้อมูลสั้น เนื่องจากระยะเวลาการถ่ายภาพจากหัวฉีดและการเคลื่อนที่ของลำพุ่งในถังทดสอบอยู่ที่ประมาณ 230 mm ความเร็วสูงสุดของน้ำมันดีเซลมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 1,400 m/s ความเร็วสูงสุดของไบโอดีเซลประมาณ 1,400 m/s ส่วนความเร็วสูงสุดของลำพุ่งเชื้อเพลิงที่มีค่าต่ำสุดคือ E95 ประมาณ 900 m/s ผลของความเร็วที่แตกต่างกันเนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิง เช่น สนูปดำมีค่าความหนืด (Viscosity: 50.7 CS) ความหนาแน่น (Density: 0.92 g/cm³) สูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นมาก ทำให้ลำพุ่งแตกตัวได้ยากดังรูปที่ 4.11 ความเร็วของลำพุ่งจึงสูง ส่วน E95 จะเห็นว่าความเร็วต่ำเนื่องจากสามารถแตกตัวได้ง่ายกว่าซึ่งจะเห็นได้ชัดจากภาพถ่ายว่า E95 จะเกิดการแตกตัวของเชื้อเพลิงดีกว่า ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 Jatropha curcas oil jets

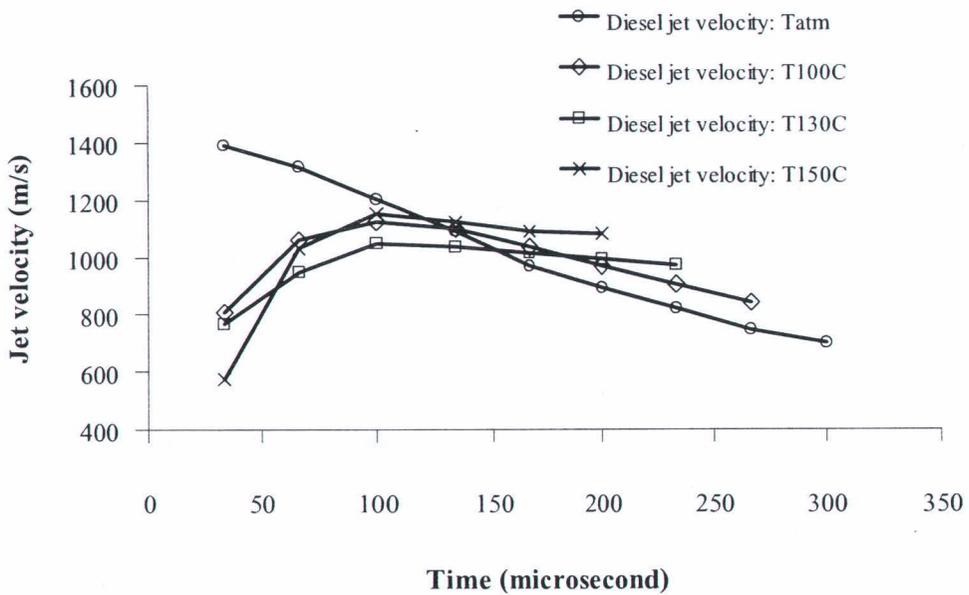
จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าบริเวณโดยรอบของลำพู่ของสบู่น้ำไม่มีเกิดการแตกตัว ลำพู่ และคลื่นช็อค มีลักษณะเป็นลำและมุมที่แหลม ปลายลำพู่ (jet tip) กับคลื่นช็อคก็เป็น attach-shock แสดงให้เห็นว่าลำพู่มีความเร็วที่สูง



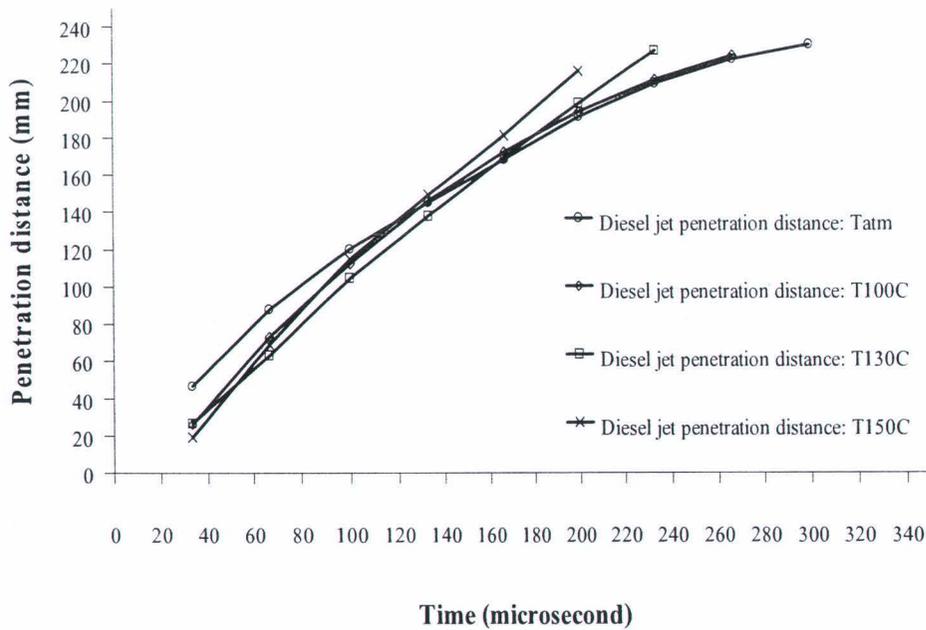
รูปที่ 4.11 Supersonic ethanol-95% (E95) jets

4.3.2 คุณสมบัติของลำพู่น้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิบรรยากาศ (30°C), 100°C, 130°C และ 150°C, ที่ความดันบรรยากาศ

จากรูปที่ 4.12 ความเร็วของลำพู่ น้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ ในความดันบรรยากาศ และรูปที่ 4.13 ระยะแหวก (Penetration distance) ของลำพู่ดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ ในความดันบรรยากาศ จะเห็นได้ว่าความเร็วของลำพู่ที่ความดันบรรยากาศมีค่าสูงสุด (ประมาณ 1,400 m/s) และความเร็วจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่วนในกรณีในห้องทดสอบถูกปรับให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ผลของความเร็วของลำพู่เริ่มต้นจะเปลี่ยนไป คือความเร็วเริ่มต้นจะมีค่าต่ำและเพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงความเร็วสูงสุดที่ทำได้แล้วถึงจะลดลง โดยที่อุณหภูมิยิ่งเพิ่มขึ้นความเร็วเริ่มต้นของลำพู่ยิ่งลดลง

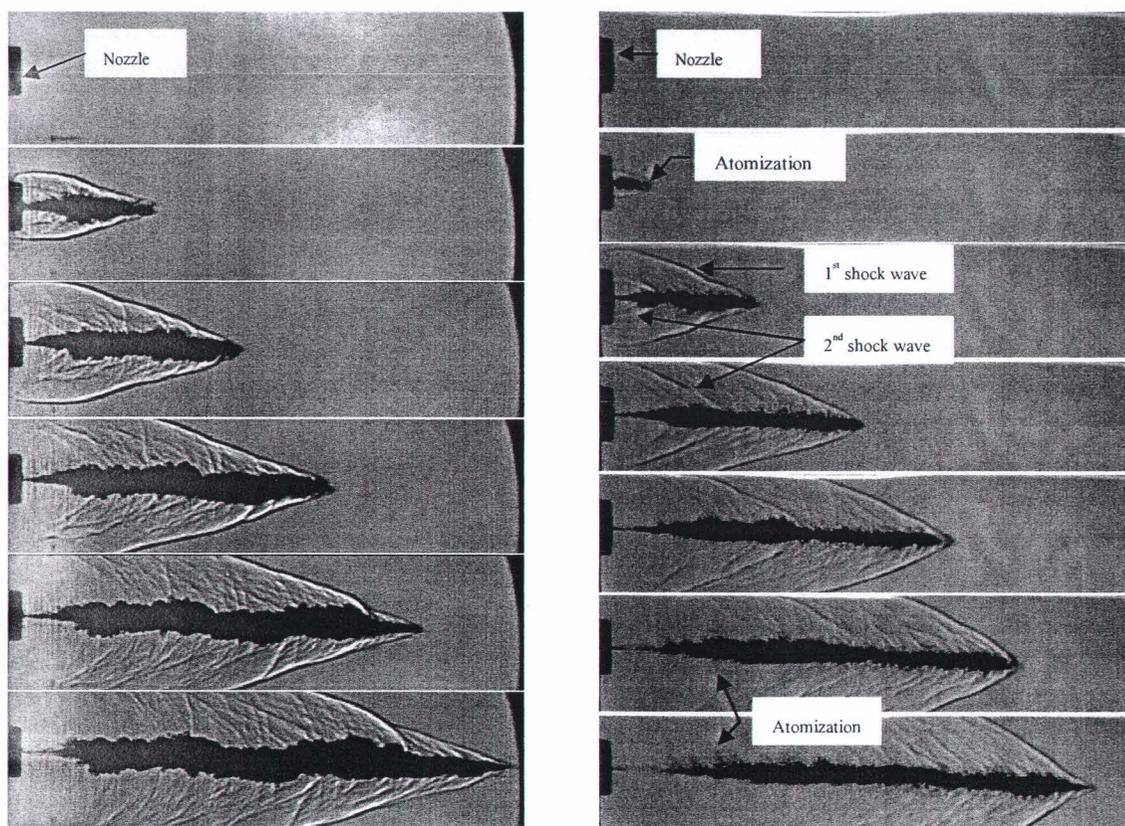


รูปที่ 4.12 Effect of temperature on diesel fuel jets velocity



รูปที่ 4.13 Effect of temperature on diesel fuel jets penetration distance

ส่วนของ ระยะแหวกของลำพ่นน้ำมันดีเซลนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันแต่อุณหภูมิของห้องทดสอบยังมีผลต่อระยะที่ลำพ่นของน้ำมันดีเซลคือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นระยะแหวกลดลง



(a) High speed diesel jets: $T30^{\circ}\text{C}$, P_{atm}

(b) High speed diesel jets: $T150^{\circ}\text{C}$, P_{atm}

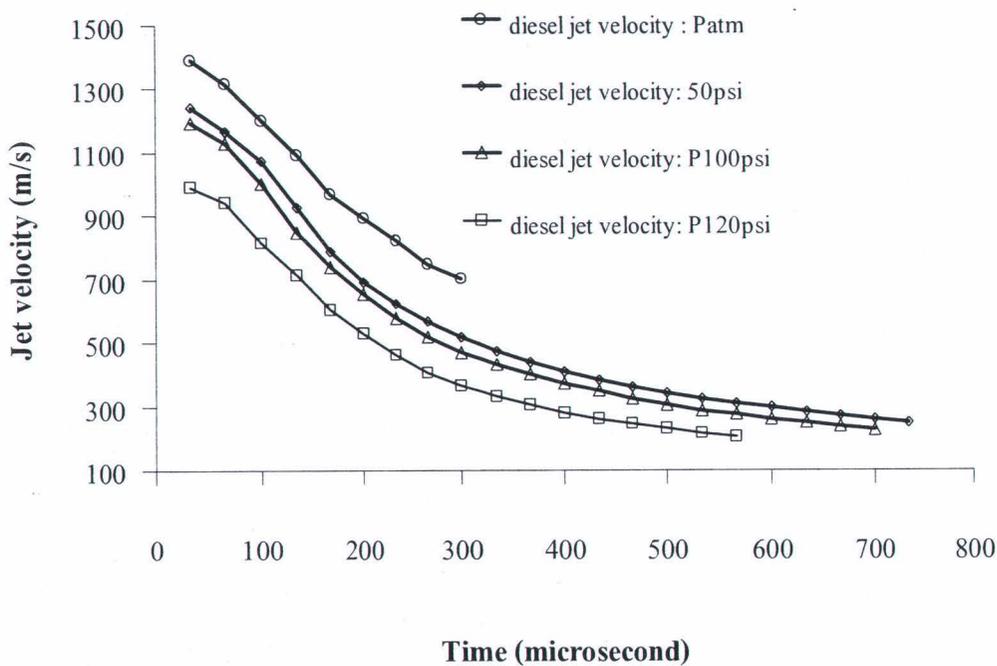
รูปที่ 4.14 Comparison of diesel fuel jets between the results from test chamber temperature: (a) atmosphere temperature 30°C and (b) 150°C

จากรูปที่ 4.14 เปรียบเทียบลำพ่นน้ำมันเชื้อเพลิงความเร็วสูงที่ห้องทดสอบ 30°C (รูปที่ 4.14a) กับ 150°C (รูปที่ 4.14b) และความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 150°C จะเห็นได้ว่าความเร็วของลำพ่นน้ำมันเชื้อเพลิงมีความเร็วที่ลดลงไม่มาก ซึ่งสังเกตได้จากระยะของลำพ่น และมุมของคลื่นช็อคที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของห้องทดสอบคือ ลำพ่นเชื้อเพลิงดีเซลเกิดแตกตัวตั้งแต่เริ่มต้น และนี่เป็นสาเหตุของความเร็วเริ่มต้นที่ต่ำกว่าลำพ่นที่ความดันบรรยากาศ

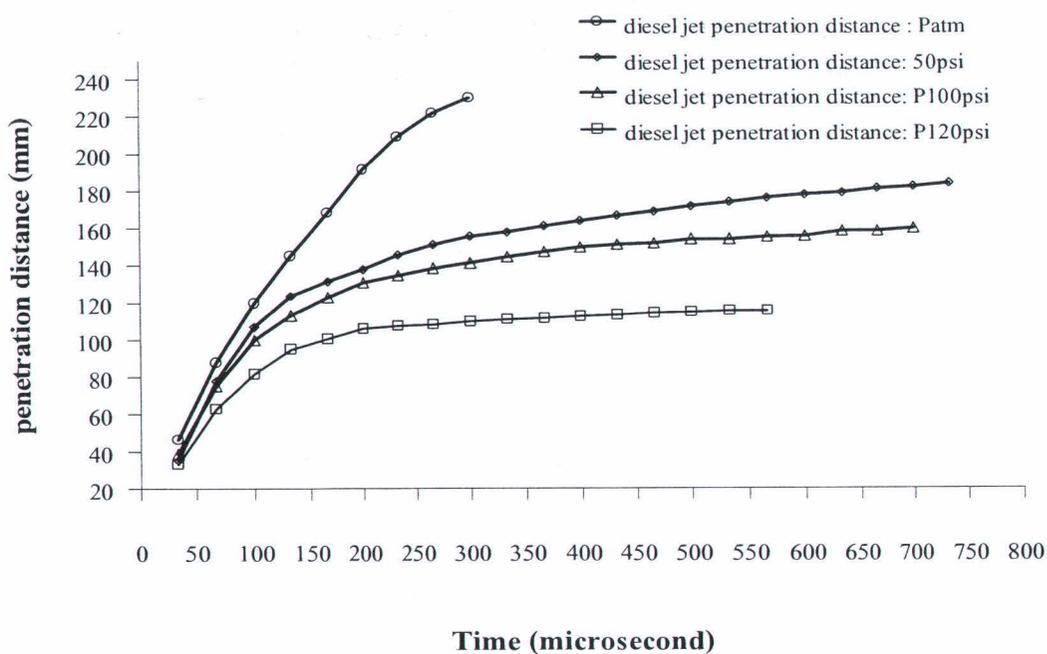
4.3.3 คุณสมบัติของลำพ่นน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมিবรรยากาศ (30°C) และที่ความดันบรรยากาศ, 50 psi, 80 psi และ 120 psi

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 เป็นผลของความเร็วและระยะแหวกลำพ่นเชื้อเพลิงดีเซลความเร็วสูงโดยใช้หัวฉีดขนาด 0.7 mm มุม 30° 1/d เป็น 4.2 mm และดินปืน 3 g ที่ถูกฉีดเข้าไปใน

ห้องทดสอบอุณหภูมিবรรยากาศ (30°C) และเปลี่ยนแปลงความดันจากความดันบรรยากาศ เป็น 50 psi, 80 psi, 120 psi

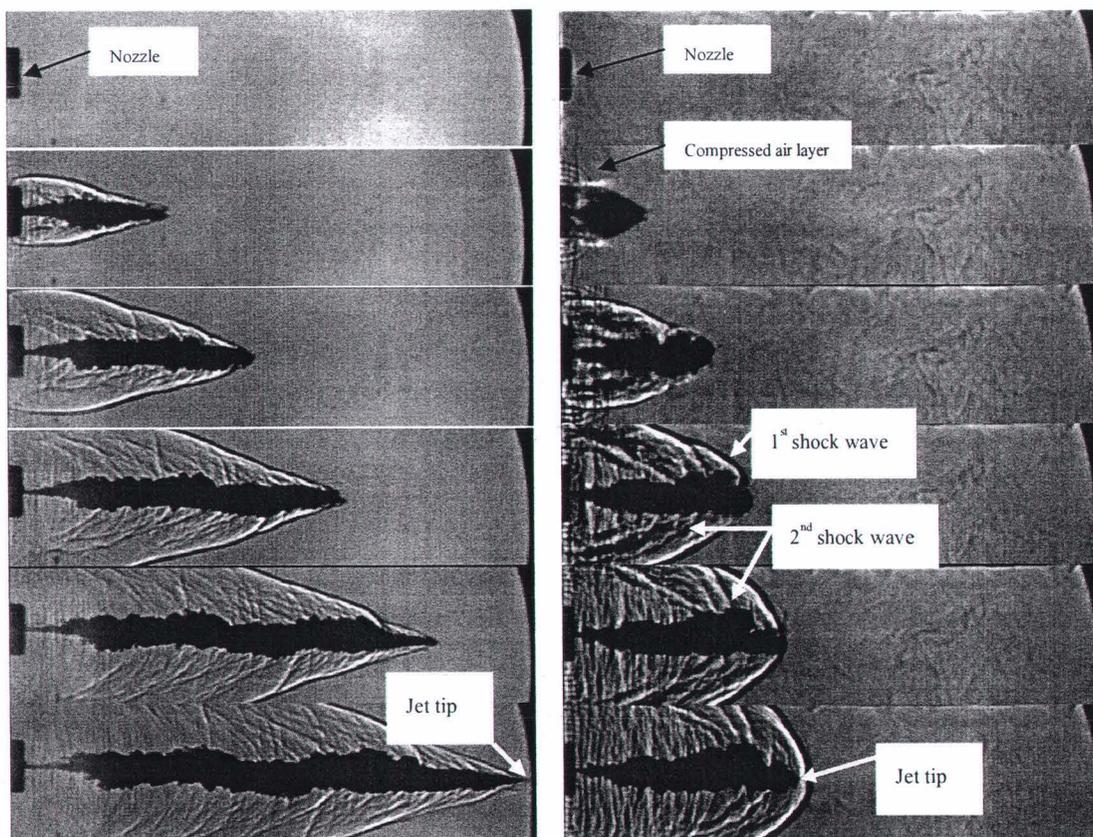


รูปที่ 4.15 Effect of pressure on supersonic diesel fuel jets velocity



รูปที่ 4.16 Effect of pressure on diesel fuel jets penetration distance

ผลการทดลองพบว่าความดันภายในห้องทดสอบมีผลต่อความเร็วเริ่มต้นของลำพุน้อยกว่าความเร็วของลำพุงที่เวลาเพิ่มขึ้น นั่นคือความเร็วเริ่มต้นของลำพุงจะสูงและค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ความเร็วสูงสุดของลำพุงจะสูงสุดที่ความดันบรรยากาศ ความดัน 50 psi 100 psi และต่ำสุดที่ 120 psi ตามลำดับ นอกจากนี้ความดันในห้องทดสอบยังมีผลต่อระยะแหวก คือ ความดันเพิ่มขึ้นระยะแหวกลดลงดังรูปที่ 4.17



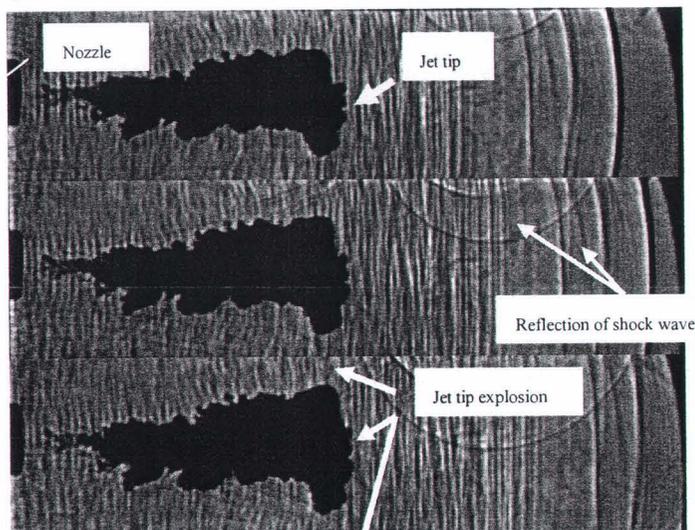
(a) High speed diesel jets: T 30°C, P_{atm}

(b) High speed diesel jets: T 30°C, P 120 psi

รูปที่ 4.17 Comparison of diesel fuel jets between the results from test chamber pressure: (a) atmosphere pressure and (b) 120 psi

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นความแตกต่างของลำพุน้ำมันดีเซลที่ฉีดเข้าไปในถังทดสอบที่มีความดันที่แตกต่างกันในเวลาเดียวกัน ลำพุงของดีเซลที่ฉีดเข้าห้องทดสอบที่มีความดัน 120 psi จะมีความเร็วที่ช้ากว่า ลำพุงจะมีขนาดใหญ่กว่า และส่วนหัว (jet tip) จะกระจายตัวออก มุมของคลื่นช็อคจะมากกว่า มุมของคลื่นช็อคที่เกิดจากลำพุงที่น้ำมันดีเซลที่ฉีดเข้าไปในห้องทดสอบที่มีความดันบรรยากาศ นอกจากนี้ในห้องทดสอบที่มีความดันที่สูงขึ้นยังไม่เกิดการแตกตัวของน้ำมัน

เชื้อเพลิง ในขณะที่เวลาเพิ่มขึ้น ส่วนหัวของลำพุ่งเชื้อเพลิงจะเริ่มกระจายตัวออก ระยะทางที่เคลื่อนที่น้อยลง ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 Jet tip explosion

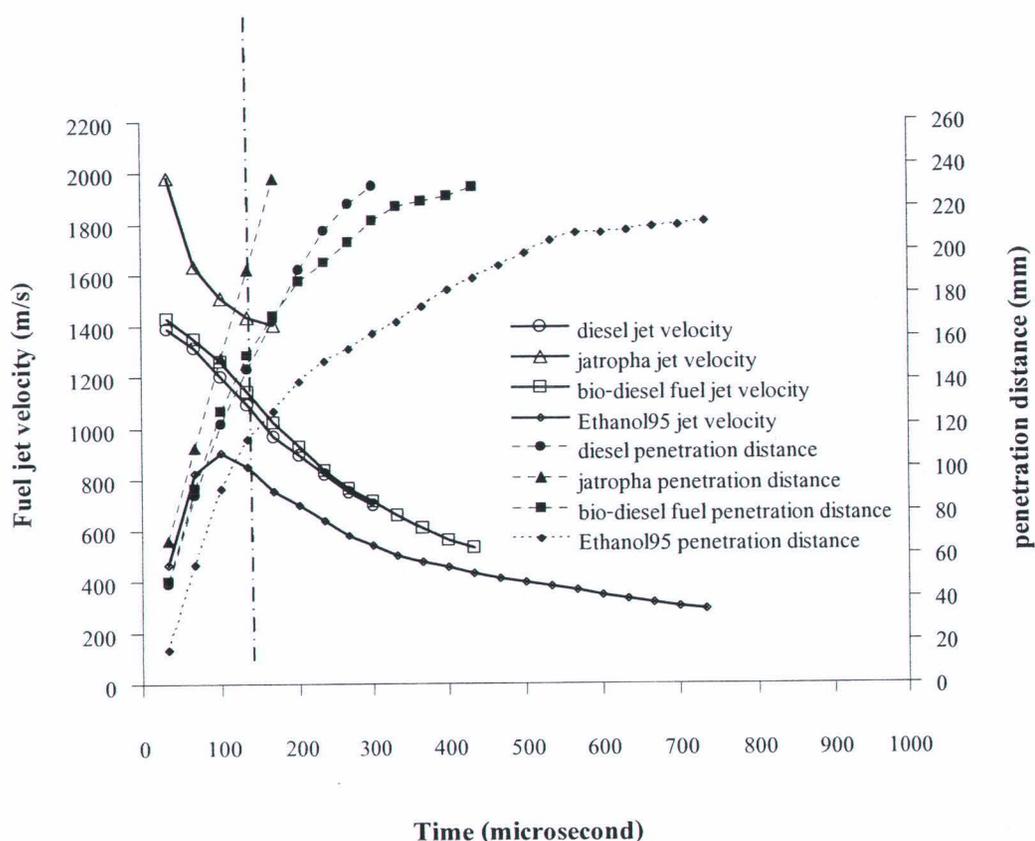
4.3.4 คุณลักษณะของลำพุน้ำมันเชื้อเพลิงภายใต้การเปลี่ยนอุณหภูมิและความดัน

ผลการทดลองที่จะกล่าวถึงในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบคุณลักษณะของลำพุน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซล (จากน้ำมันพืชใช้แล้ว) และสบู่ดำ ภายใต้อุณหภูมิและความดันของห้องทดสอบต่างๆ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อคุณลักษณะของลำพุ่งเชื้อเพลิงต่างๆ ข้างต้น

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 ผลของความเร็วของลำพุ่งเชื้อเพลิงต่างๆ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ (30°C) และความดันบรรยากาศ ลำพุ่งของสบู่ดำมีความเร็วสูงที่สุด ($\sim 2,000$ m/s) และเคลื่อนที่ไปได้ไกลกว่าเชื้อเพลิงอื่นที่เวลาเดียวกัน เช่นที่เวลา $166 \mu\text{s}$ เคลื่อนที่ไปได้ไกล 233 mm ซึ่งเป็นระยะสูงสุดที่ชุดทดลองสามารถวัดได้ ส่วนลำพุ่งที่มีความเร็วต่ำสุดคือ E95 มีความเร็วสูงสุดเพียง 900 m/s และที่เวลา $166 \mu\text{s}$ ลำพุ่งเคลื่อนที่ไปได้เพียง 126 mm ดังรูปที่ 4.19

ในส่วนของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลมีความเร็วของลำพุ่ง ($\sim 1,400$ m/s) และ คลื่นช็อกที่ใกล้เคียงกันมาก เช่นที่เวลา $166 \mu\text{s}$ น้ำมันดีเซลเคลื่อนที่ไปได้ 168 mm ส่วนน้ำมันไบโอดีเซลเคลื่อนที่ไปได้ 170 mm ดังรูปที่ 4.20

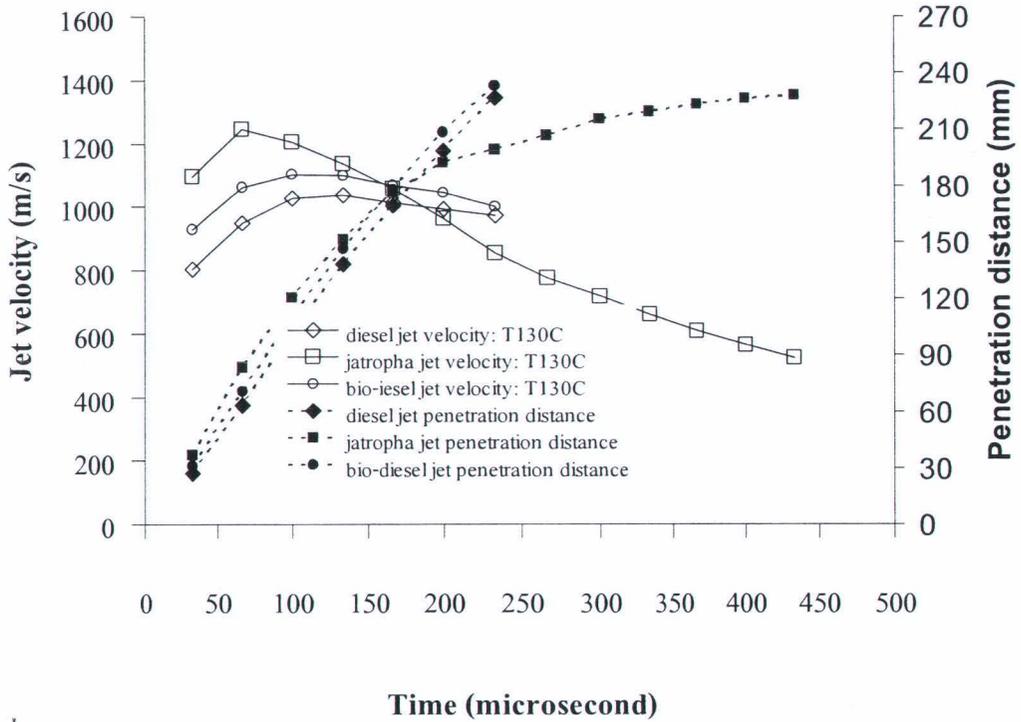
เมื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ พบว่าความเร็วของลำพุ่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดที่ทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิบรรยากาศ (ที่อุณหภูมิ 30°C) ดังรูปที่ 4.19, 130°C และ 150°C ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ลดลง โดยเฉพาะความเร็วของลำพุ่งในช่วงเริ่มต้น นอกจากนี้ความเร็วของลำพุ่งและคลื่นช็อกของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลยังมีค่าใกล้เคียงกันมาก



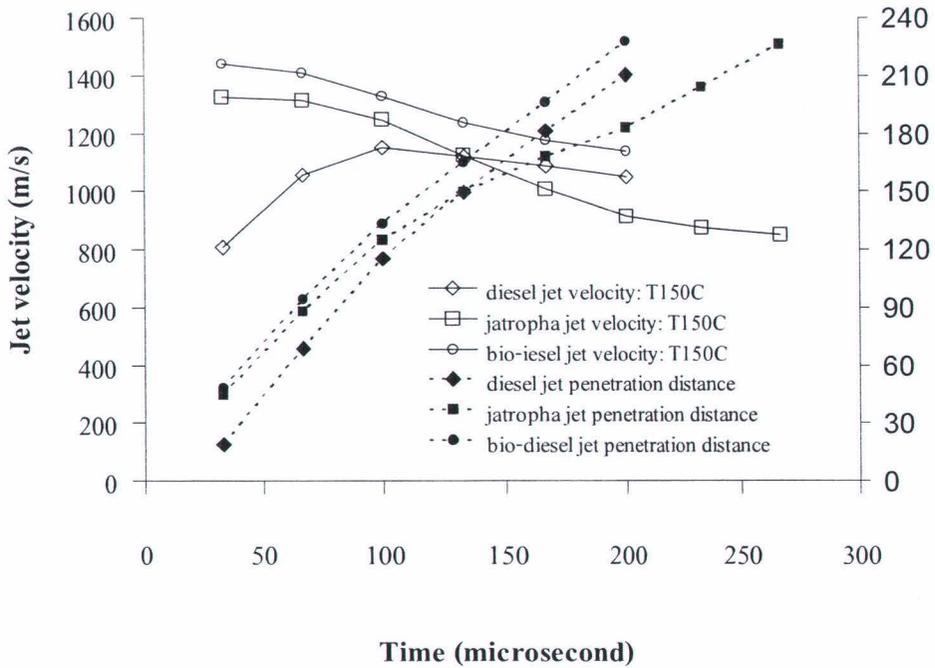
รูปที่ 4.19 Plots of penetration distance of fuel jets and average jet velocity against emerging time

: $T_{30}^{\circ}\text{C}$, P_{atm}

จากรูปที่ 4.20 ผลของคลื่นช็อคกับความเร็วมวลของลำพุงเชื้อเพลิงดีเซล สบู่ดำ และไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ที่อุณหภูมิของห้องทดสอบ 130°C ความดันบรรยากาศ จากกราฟข้อมูลจะเห็นว่าความเร็วเริ่มต้นของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดจะเพิ่มขึ้น แล้วจึงค่อยๆ ลดลง ความเร็วสูงสุดเป็นสบู่ดำ ที่ประมาณ $1,300\text{ m/s}$ (ที่อุณหภูมิ 30°C ความเร็วประมาณ $2,000\text{ m/s}$) ส่วน คลื่นช็อคของน้ำมันสบู่ดำอยู่ที่ 230 mm ที่เวลาประมาณ $430\text{ }\mu\text{s}$ (เป็นระยะที่สามารถวัดได้ เนื่องจากข้อจำกัดของชุดทดลอง, ที่อุณหภูมิ 30°C ระยะประมาณ 230 mm ที่เวลา $166\text{ }\mu\text{s}$) ความเร็วสูงสุดของน้ำมันไบโอดีเซลประมาณ $1,100\text{ m/s}$ ที่เวลา $99\text{ }\mu\text{s}$ ส่วนคลื่นช็อค ประมาณ ระยะประมาณ 230 mm ที่เวลา $233\text{ }\mu\text{s}$ น้ำมันดีเซลมีความเร็วสูงสุดประมาณ $1,000\text{ m/s}$ ที่เวลา $99\text{ }\mu\text{s}$ คลื่นช็อคประมาณ ระยะประมาณ 230 mm ที่เวลา $233\text{ }\mu\text{s}$



រូបភាព 4.20 Plots of penetration distance of fuel jets and average jet velocity against emerging time : T130 °C, P_{atm}



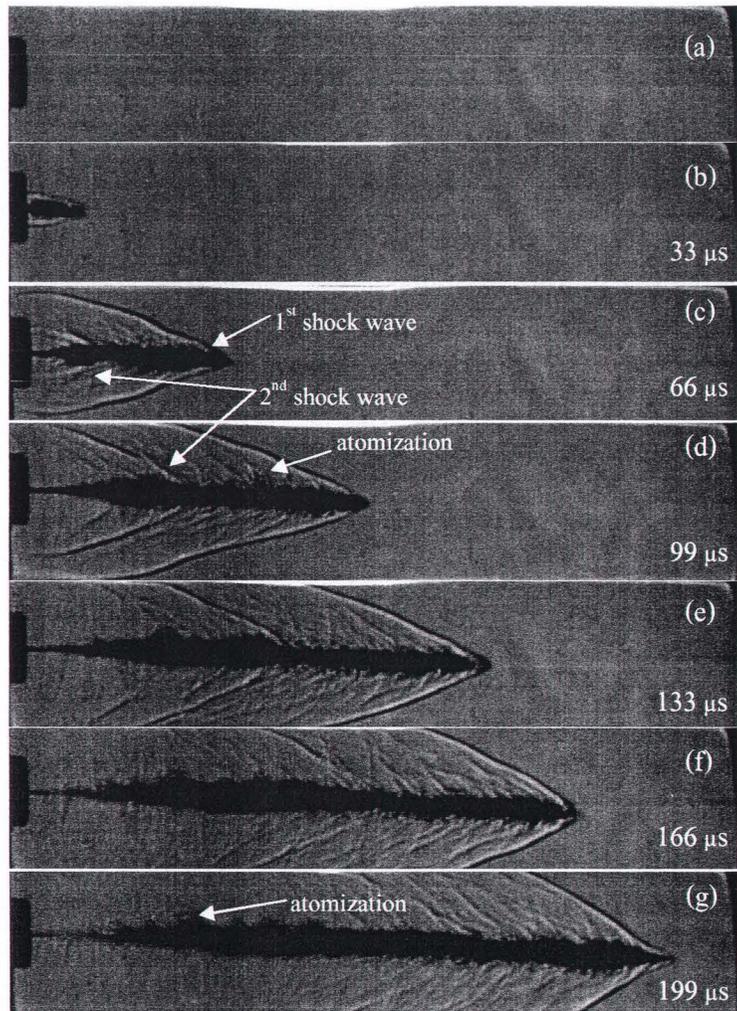
រូបភាព 4.21 Plots of penetration distance of fuel jets and average jet velocity against emerging time: T150 °C, P_{atm}

จากรูปที่ 4.20 ผลของระยะแหวกกับความเร็วของลำพุ่งเชื้อเพลิงดีเซล สบู่ดำ และไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพีซีแล้ว ที่อุณหภูมิของห้องทดสอบ 150°C ความดันบรรยากาศ จากกราฟข้อมูลจะเห็นว่าความเร็วเริ่มต้นของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดสูงกว่าความเร็วของลำพุ่งที่ห้องทดสอบ อุณหภูมิ 130°C แล้วจึงค่อยๆ ลดลง ความเร็วสูงสุดเป็นไบโอดีเซลที่ประมาณ $1,400\text{ m/s}$ (ที่อุณหภูมิ 30°C ความเร็วประมาณ $2,000\text{ m/s}$) ส่วนระยะแหวกอยู่ที่ 230 mm ที่เวลาประมาณ $199\text{ }\mu\text{s}$ (เป็นระยะที่สามารถวัดได้ เนื่องจากข้อจำกัดของชุดทดลอง, ที่อุณหภูมิ 30°C ระยะประมาณ 230 mm ที่เวลา $430\text{ }\mu\text{s}$) ซึ่งจะเห็นว่าที่ใช้ลดลงในระยะทางเท่ากัน

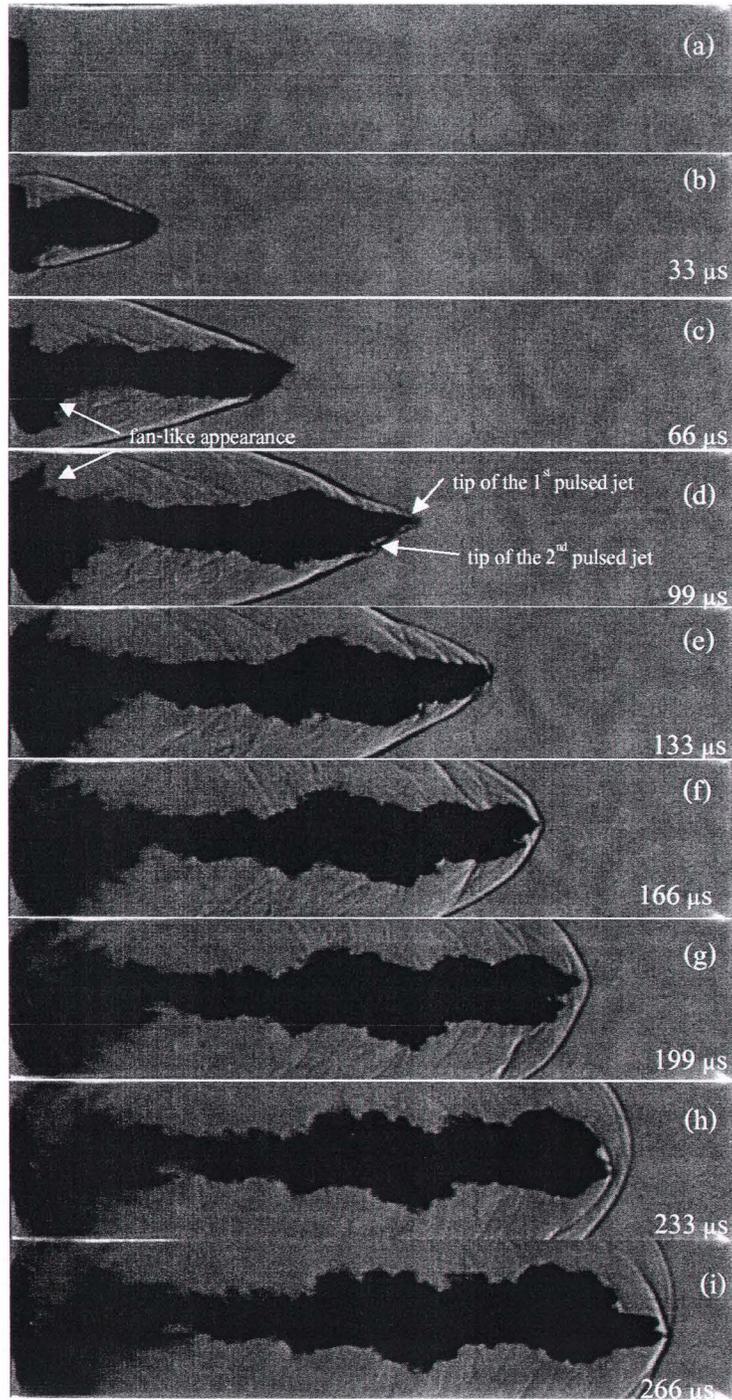
ความเร็วสูงสุดของน้ำมันสบู่ดำประมาณ $1,300\text{ m/s}$ ที่เวลา $33\text{ }\mu\text{s}$ ส่วนระยะแหวกประมาณ ระยะประมาณ 230 mm ที่เวลา $260\text{ }\mu\text{s}$ ซึ่งจะเห็นว่าเวลาลดลง น้ำมันดีเซลมีความเร็วสูงสุดประมาณ $1,100\text{ m/s}$ ที่เวลา $99\text{ }\mu\text{s}$ Penetration distance ประมาณ ระยะประมาณ 210 mm ที่เวลา $199\text{ }\mu\text{s}$

รูปที่ 4.22 แสดงลำพุ่งเชื้อเพลิงดีเซลที่ฉีดเข้าไปในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C ความดันบรรยากาศ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง Photron SA-5 กับชุด Shadowgraph Technique ที่ความเร็วเฉลี่ยเริ่มต้น (รูปที่ 4.23b) ประมาณ 800 m/s เวลา $33\text{ }\mu\text{s}$ และความเร็วเฉลี่ยสุดท้าย (รูปที่ 4.23g) ประมาณ $1,050\text{ m/s}$ ที่เวลา $199\text{ }\mu\text{s}$ ที่รูปที่ 4.23c จะเห็นคลื่นช็อค 2 ลูก ซึ่งเกิดจากลำพุ่งของดีเซลที่ถูกฉีดออกมามีความเร็วภายในแตกต่างกัน แต่คลื่นช็อคลูกที่ 1 ยังคงนำหน้า คลื่นช็อคลูกที่ 2 นั้นแสดงว่าลำพุ่งลูกที่ 1 มีความเร็วสูงกว่า นอกจากนี้ยังเห็นการเกิดการแตกตัว (atomization) ของลำพุ่งน้ำมัน

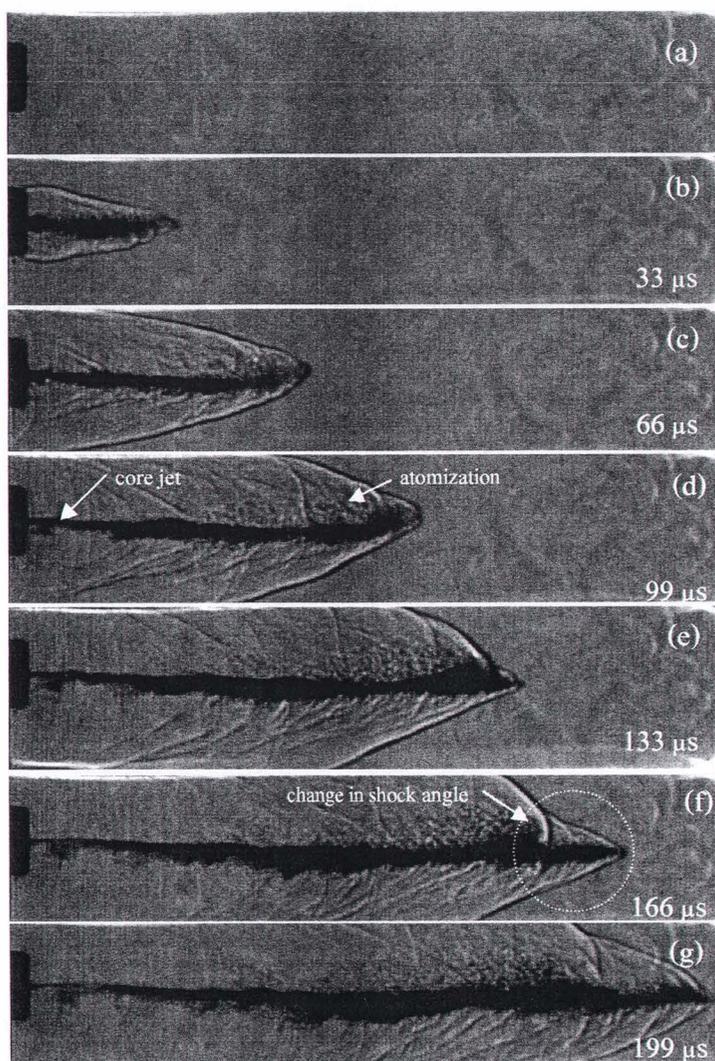
รูปที่ 4.23 แสดงลำพุ่งน้ำมันสบู่ดำที่ฉีดเข้าไปในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C ความดันบรรยากาศ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง Photron SA-5 กับชุด Shadowgraph Technique ที่ความเร็วเฉลี่ยเริ่มต้น (รูปที่ 4.23b) ประมาณ $1,326\text{ m/s}$ ที่เวลา $33\text{ }\mu\text{s}$ และความเร็วเฉลี่ยสุดท้าย (รูปที่ 4.23i) ประมาณ 850 m/s ที่เวลา $266\text{ }\mu\text{s}$ ที่รูปที่ 4.23c จะเห็น ลำพุ่ง 2 ลูก ซึ่งเกิดจากลำพุ่งของดีเซลที่ถูกฉีดออกมามีความเร็วภายในแตกต่างกัน และความเร็วของลำพุ่งลูกที่ 2 เริ่มมีความเร็วที่สูงขึ้น จนมีความเร็วที่สูงกว่าลำพุ่งลูกที่ 1 ที่เวลา $233\text{ }\mu\text{s}$ จนที่เวลา $266\text{ }\mu\text{s}$ ลำพุ่งลูกที่ 2 สูงกว่าลูกที่ 1 และ คลื่นช็อคลูกที่ 2 นำหน้าคลื่นช็อคลูกที่ 1 นอกจากนี้ยังเห็นการเกิดการกระจายตัว (fan-like) ของลำพุ่งน้ำมันที่บริเวณส่วนปลายหัวฉีด



รูปที่ 4.22 Diesel fuel jet and shock wave at $M=2.1$ ($v_j=1,150$ m/s, $C=528$ m/s @150°C)



รูปที่ 4.23 *Jatropha curcas* oil jet and shock wave at $M=2.5$ ($v_j=1,325$ m/s, $C=528$ m/s @150°C)

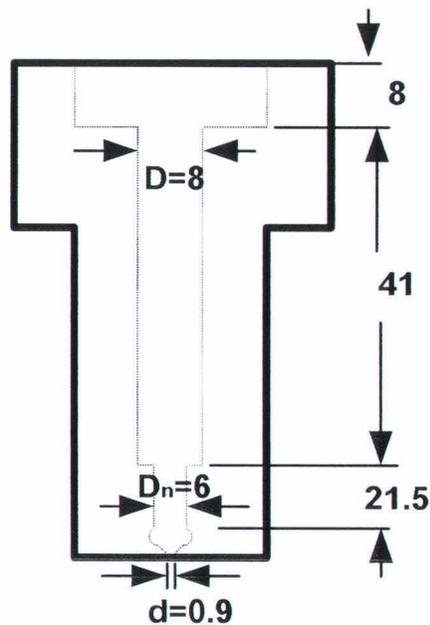


รูปที่ 4.24 Bio-diesel jet and shock wave at $M = 2.7$ ($v_j = 1,441$ m/s, $C = 528$ m/s @150°C)

รูปที่ 4.24 แสดงลำพ่นน้ำมันไบโอดีเซลที่ฉีดเข้าไปในห้องทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C ความดันบรรยากาศ ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง Photron SA-5 กับชุด Shadowgraph Technique ที่ความเร็วเฉลี่ยเริ่มต้น (รูปที่ 4.24b) ประมาณ 1,441 m/s ที่เวลา 33 μ s และความเร็วเฉลี่ยสุดท้าย (รูปที่ 4.24g) ประมาณ 1,150 m/s ที่เวลา 199 μ s ที่รูปที่ 4.24d จะเห็นลำพ่นของไบโอดีเซลเริ่มแตกตัว ตั้งแต่รูปที่ 4.24b และชัดเจนมากตั้งแต่รูปที่ 4.24d รูปที่ 4.24e แสดงให้เห็นถึงลำพ่นลูกที่ 2 ชัดเจนขึ้นเนื่องจากส่วนหัวลำพ่นลูกแรก แตกตัว (รูปที่ 4.24d) ในรูปที่ 4.24f จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของคลื่นช็อคกั้น นั้นแสดงถึงความเร็วที่เปลี่ยนแปลงของลำพ่น เกิดจากลำพ่นที่ถูกฉีดออกมาด้วยความเร็วภายในแตกต่างกัน และความเร็วของลำพ่นลูกที่ 2 มีความเร็วที่สูงขึ้น จนมีความเร็วที่สูงกว่าลำพ่นลูกที่ 1

4.3.5 คุณสมบัติของลำพ่นน้ำมันเชื้อเพลิงจากหัวฉีดดีเซลแบบรูเดี่ยว

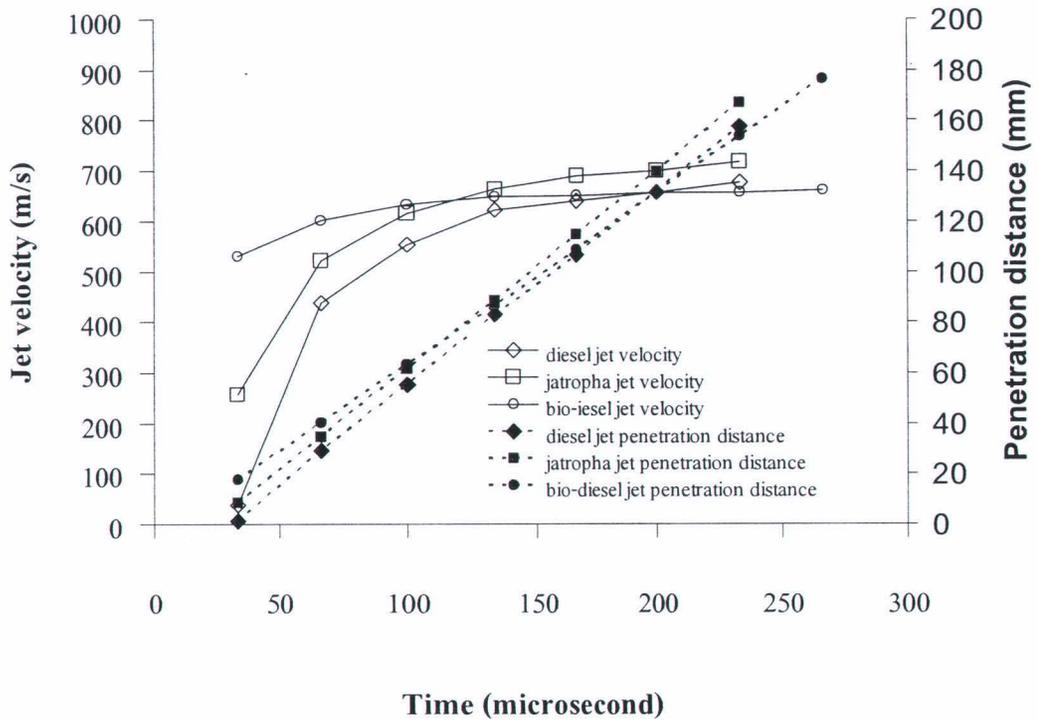
ผลการทดลองที่จะกล่าวถึงในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติของลำพ่นน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซล (จากน้ำมันพืชใช้แล้ว) และสบู่ดำ ภายใต้อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ โดยลำพ่นน้ำมันเชื้อเพลิงถูกกำเนิดจากการกระแทกของลูกปืนที่มีความเร็วประมาณ 800 m/s (คืนปืน 3 g) ปริมาณของเหลวในหัวฉีด 4 cc หัวฉีดขนาด 0.9 mm ดังรูปที่ 4.25



(Unit: mm.)

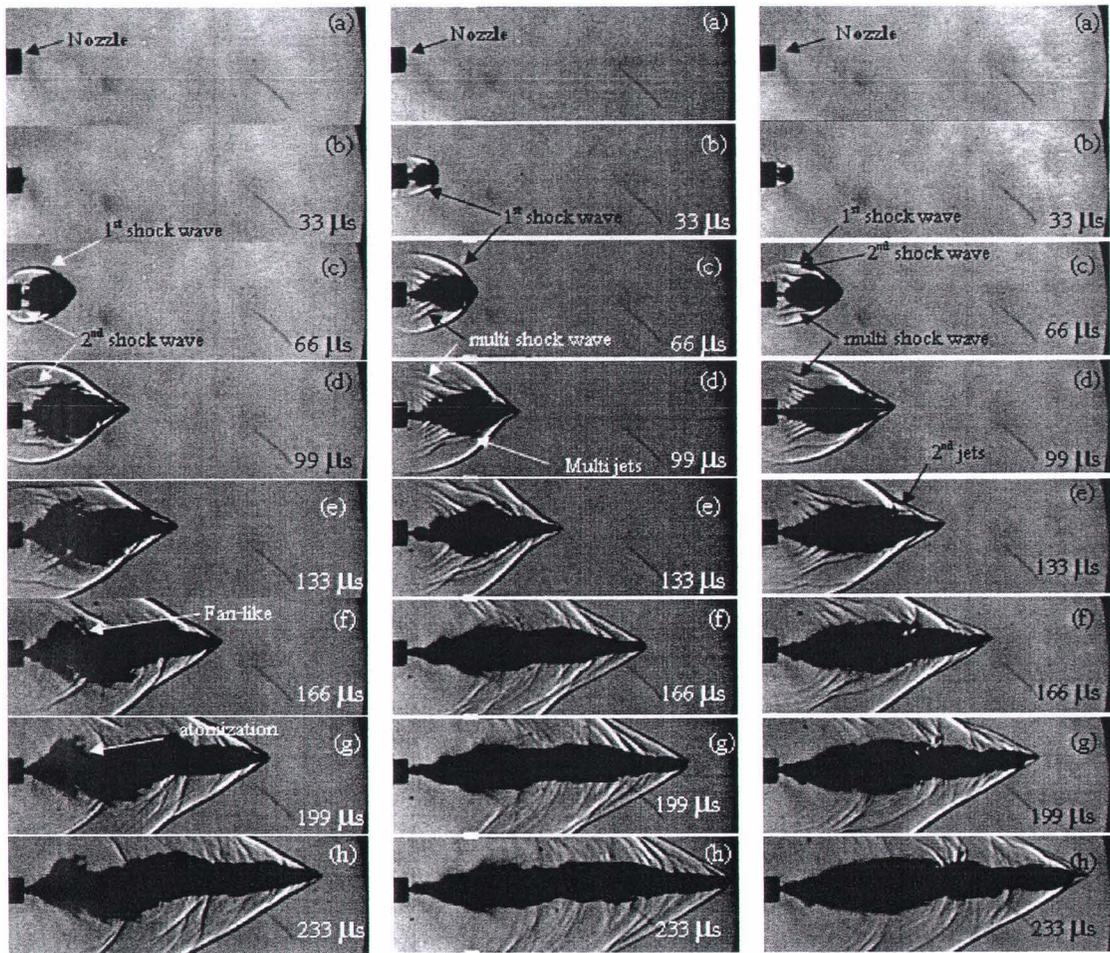
รูปที่ 4.25 single-hole diesel nozzle

จากผลการทดลองพบว่าความเร็วของลำพ่นทั้ง 3 ชนิดต่ำกว่าหัวฉีดที่ออกแบบมาก เฉลี่ยประมาณ 700 m/s ความเร็วของลำพ่นใกล้เคียงกัน และความเร็วค่อนข้างคงที่กว่า ส่วน Penetration distance มีค่าใกล้เคียงกัน เช่น ที่ 166 μ s Penetration distance ประมาณ 100 mm ดังรูปที่ 4.26 ซึ่งสาเหตุเกิดจากขนาดของคอคอดที่โตกว่าหัวฉีดที่ออกแบบ (0.7 mm) และ l/d มีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 4.26 Plots of penetration distance of fuel jets and average jet velocity against emerging time from single-hole diesel nozzle

จากรูปที่ 4.27 ภาพถ่ายลำพู่ของน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซล และสบู่ดำจากหัวฉีดเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 0.9 mm ด้วยเทคนิค Shadowgraph ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ชัดเจนถึงลักษณะของลำพู่ที่เริ่มต้นที่ 33 μs จะเป็น bow liquid jet และคลื่นช็อคซึ่งจะแตกต่างจากหัวฉีดแบบกรวย ที่ออกแบบและทำการทดลองในก่อนหน้านี้ นอกจากนี้พฤติกรรมที่แตกต่างกันอย่างมากคือ การเกิด คลื่นช็อคหลายครั้ง (multiple pulse shock wave) ในหัวฉีดดีเซล ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่น่าสนใจต่อไป



(a) Diesel jet

(b) Biodiesel jet

(c) Jatropa cuscese oil jet

รูปที่ 4.27 Shadowgraph photographs of high-speed fuel jet from a diesel nozzle

