

บทที่ 3

การศึกษาลำพุงความเร็วสูงจากการกระแทก ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข (CFD)

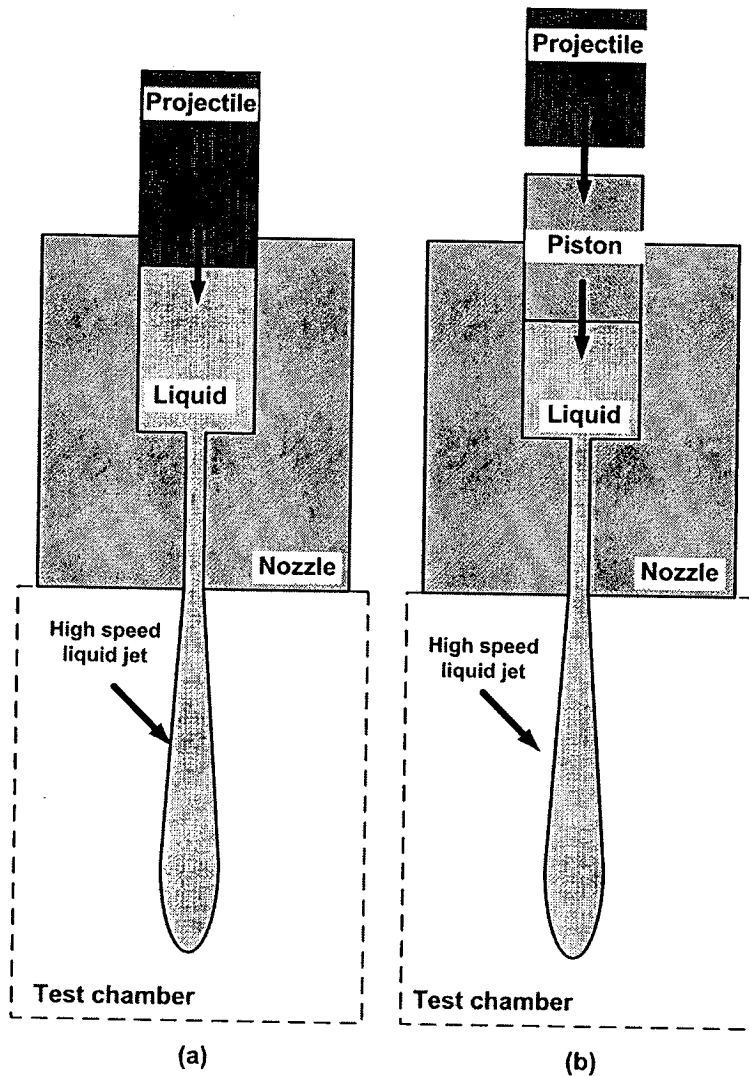
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการศึกษา การกำเนิดและคุณลักษณะของลำพุง จากการกระแทก โดยใช้ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) หรือที่นิยมเรียกว่า “CFD” งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Fluent คำนวณด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume) โดยรายละเอียดของบทนี้จะกล่าวถึง ขอบเขตปัญหา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระเบียบวิธีคำนวณของลำพุงที่สร้างด้วยหลักการการกระแทก ทั้งนี้ เจาะลึกปัญหา และกรณีศึกษา ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาของผู้ทำรายงานและนักวิจัยท่านอื่นที่ได้ทำการทดลองไว้ เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง และศึกษาคุณลักษณะของลำพุง จากอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ

3.1 กลไกการกำเนิดลำพุงความเร็วสูงด้วยวิธี IDM

ลำพุงของเหลวความเร็วสูง โดยทั่วไปสร้างจากการอัดความดันของเหลวให้มีความดันสูงและปล่อยให้ไหลออกผ่านช่องทางขนาดเล็ก ซึ่งความดันสามารถสร้างขึ้นด้วยหลักการ 2 ประเภท คือ การทำงานของอุปกรณ์เชิงกล (Mechanical device driving) เช่น ปัม หลักการนี้นิยมใช้กับการฉีดลำพุงในห้องเผาไหม้ หรือ ลำพุงสำหรับการตัดวัตถุ และการอัดหรือกดของเหลวด้วยวัตถุ (Driving object) ที่มีพลังงานจลน์สูงหรือถ่ายทอดจากแหล่งพลังงานสูง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาการสร้างลำพุงด้วยหลักการกระแทกของวัตถุ (Impact driven method) ซึ่ง ใช้หลักการกระแทกของวัตถุหรือลูกปืนที่มีความเร็ว บนของเหลวในหัวฉีด ให้มีความดันสูงและไหลออกจากหัวฉีดด้วยความเร็ว แสดงหลักการนี้ดังรูปที่ 3.1 ด้วยหลักการนี้สามารถแบ่งได้อีก 2 แบบ คือ แบบที่ 1 กระแทกและขับโดยตรง (Direct impact method) ซึ่งลูกปืนจะกระแทกลงโดยตรงบนของเหลว และขับของเหลวออกจากหัวฉีดจนสิ้นสุดกระบวนการ (ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (a)) และ แบบที่ 2 กระแทกและขับผ่านตัวกลาง (Momentum exchange method) โดยลูกปืนจะกระแทกบนวัตถุตัวกลางในการขับของเหลว (ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (b))

ในการรายงานวิจัยนี้จะนำเสนอ การศึกษาของการกำเนิดลำพุงจากวิธีการกระแทกด้วยวัตถุ ทั้งสองรูปแบบ ซึ่งจะอาศัยเงื่อนไขการศึกษาและข้อมูล จากงานวิจัยที่ผ่านมา ของ Pianthong [22, 23] [1-2] Mattujak [5] และ Shi[4, 10]



รูปที่ 3.1 การกำเนิดลำพุ่งด้วยการกระแทก (a) กระแทกและขับโดยตรง และ (b) กระแทกและขับผ่านตัวกลาง

3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการไหลของลำพุ่งความเร็วสูง ที่เกิดจากการกระแทก ซึ่งจะมีรายละเอียดของสมการควบคุมปัญหา (Governing equation) แบบจำลองการไหลแบบสองสถานะ ของการเคลื่อนที่ของลูกปืน คุณสมบัติของของไหลแบบอัดตัวได้ และ ระเบียบวิธีคำนวณ ที่ใช้ในการศึกษานี้

3.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของของไหลผสม แบบ Mixture

พฤติกรรมการไหลและการเปลี่ยนสถานะระหว่างของเหลวและไอ ถูกจำลองด้วยแบบจำลองการผสมกันแบบ Mixture ระหว่างอากาศและของเหลว โดยแบบจำลองนี้จะพิจารณาให้มีของไหลชนิดเดียวหรือของผสมที่มีของไหลสองสถานะ ซึ่งเกาะติดกันอย่างมั่นคง โดยแต่ละสถานะจะมีค่าความเร็วเป็นของตัวเอง และมีสัดส่วนปริมาตรของแต่ละสถานะในปริมาตรควบคุมนั้นสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ ของสมการอนุรักษ์มวลแบบไม่คงตัว (Unsteady state continuity equation) ของของผสมได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho_m)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_{m,i})}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมของของผสม สามารถหาได้จากผลรวมของโมเมนตัมของแต่ละสถานะเข้าด้วยกันจะได้ดังสมการ (3.2) ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho_m u_{m,j})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m u_{m,i} u_{m,j}) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_m \left(\frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_k} + \frac{\partial u_{m,k}}{\partial x_i} \right) \right] + F_j + \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_k \rho_k u_{dr,k,i} u_{dr,k,j}) \quad (3.2)$$

เมื่อ i และ j คือ ตัวบ่งชี้พิกัด (Coordinate index) F คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง (body force) α_k คือ สัดส่วนปริมาตร (Volume fraction) ของสถานะ k

จากสมการ (3.1 และ 3.2) ค่า μ_m และ ρ_m คือ ค่าความหนืดและความหนาแน่นของของผสมตามลำดับ ได้จากสมการดังนี้

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (3.3)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3.4)$$

นอกจากนี้ค่า u_m คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยมวล (Mass-averaged velocity) หรือความเร็วของของผสม ขณะที่ค่า $u_{dr,k}$ คือ ความเร็วลอยเลื่อน (Drift velocity) ของสถานะ k ได้จากสมการ

$$u_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_k}{\rho_m} \quad (3.5)$$

$$u_{dr,k} = u_k - u_m \quad (3.6)$$

ความเร็วลอยเลื่อน (u_{dr}) จะมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วสัมพัทธ์ (Relative velocity or slip velocity) u_{pq} ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ (3.7) ดังนี้

$$u_{dr,p} = u_{pq} - \sum_{k=1}^n c_k u_{qk} \quad (3.7)$$

เมื่อ c_k คือ สัดส่วนมวล (Mass fraction) ของสถานะ k และ ความเร็วสัมพัทธ์ (u_{pq}) เป็นความเร็วของสถานะทุติยภูมิ (Secondary phase) p ที่สัมพันธ์กับความเร็วสถานะปฐมภูมิ (Primary phase) q ดังนี้

$$u_{pq} = u_p - u_q \quad (3.8)$$

จากคู่มือใช้งานของ FLUENT [66], นิยามค่าความเร็วสัมพัทธ์หาได้จาก

$$u_{pq} = \frac{\rho_p d_p^2 (\rho_p - \rho_m)}{18 \mu_q f_{drag} \rho_p} a \quad (3.9)$$

เมื่อ τ_p คือ เวลาคืนตัวของอนุภาค (Particle relaxation time) d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของของไหลสถานะทุติยภูมิ p และ ค่าฟังก์ชันการต้าน (Drag function) f_{drag} หาได้จาก

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 \text{Re}^{0.687} & \text{Re} \leq 1000 \\ 0.0183 \text{Re} & \text{Re} \geq 1000 \end{cases} \quad (3.10)$$

และ ความเร่ง (a) จะอยู่ในรูปของ

$$a = g - u_m \frac{\partial u_m}{\partial x_i} - \frac{\partial u_m}{\partial t} \quad (3.11)$$

สมการพลังงานของของผสมอยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$\sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k E_k) + \sum_{k=1}^n (\rho_k E_k + p) \frac{\partial}{\partial x_i} \alpha_k u_{k,i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i}) \quad (3.12)$$

ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน k_{eff} (Effective conductivity) คำนวณได้จาก

$$k_{eff} = \sum \alpha_k (k_k + k_t) \quad (3.13)$$

เมื่อ k_k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) และ k_t คือ ค่าการนำความร้อนปั่นป่วน (Turbulent thermal conductivity) นิยามจากแบบจำลองความปั่นป่วน เนื่องจากในการศึกษานี้ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ standard $k - \varepsilon$ ดังนั้น k_t สามารถคำนวณได้จาก

$$k_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (3.14)$$

เมื่อ c_p คือ ความร้อนจำเพาะของของไหลทุกชนิด Pr_t คือ ตัวเลข Prandtl ความปั่นป่วน (Turbulent Prandtl number) ในที่นี้ $Pr_t = 0.85$ และ ความหนืดปั่นป่วน μ_t (Turbulent viscosity) สามารถคำนวณได้จากพลังงานจลน์ปั่นป่วน k (Turbulence kinetic energy) และ อัตราการเปลี่ยนแปลงรูป ε (Rate of dissipation) ตามสมการดังนี้

$$\mu_t = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.15)$$

เมื่อ C_μ คือ ค่าคงที่ในแบบจำลองความปั่นป่วน เพื่อให้สมการควบคุมสามารถหาคำตอบได้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ standard $k - \varepsilon$ ถูกนำมาใช้สำหรับปรากฏการณ์การปั่นป่วนของการไหล ซึ่งจะมีสมการใหม่เพิ่มขึ้นมาอีกสองสมการ คือ สมการพลังงานจลน์ปั่นป่วน k และ สมการอัตราการเปลี่ยนแปลงรูป ε ซึ่งทั้งสองสมการสามารถเขียนในรูปสมการส่งถ่าย (Transport equations) ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m k u_{m,i}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_i} + \frac{\partial u_{m,j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_i} - \rho \varepsilon - 2\rho \varepsilon M_i^2 \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m \varepsilon u_{m,i}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} C_\mu \rho_m k \left(\frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_i} + \frac{\partial u_{m,l}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_i} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.17)$$

ในการศึกษานี้ค่าคงที่ของสมการ $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, และ C_μ ในสมการ (3.16) และ (3.17) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09$$

และ M_t คือ ค่าตัวเลขมาร์คความปั่นป่วน (Turbulent Mach number) จากอิทธิของการอัดตัวได้ของของไหลในสมการของแบบจำลองความปั่นป่วน

สมการสัดส่วนปริมาตรของสถานะทุติยภูมิ เขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_p \rho_p u_{m,i}) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_p \rho_p u_{dr,p,i}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (3.18)$$

เมื่อ \dot{m}_{qp} คือ การถ่ายเทมวลจากสถานะปฐมภูมิ q เป็นสถานะทุติยภูมิ p และกลับกัน \dot{m}_{pq} คือ การถ่ายเทมวลจากสถานะทุติยภูมิ p กลับเป็นสถานะปฐมภูมิ q

3.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation)

เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของปัญหาลำพุ่งความเร็วสูงที่เกิดจากการระเหยโดยมากเกิดขึ้นจากการระเหย (Evaporation) เนื่องจากการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation) ในของเหลวระหว่างการแตกของลูกปืน ซึ่งเกิดขึ้นเร็วและค่าความดันของของไหลเปลี่ยนแปลงมาก ในเวลาอันสั้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาปรากฏการณ์นี้ในการคำนวณด้วยโดยมีรายละเอียดของแบบจำลองดังต่อไปนี้

ในการศึกษานี้ แบบจำลองปรากฏการณ์เกิดโพรงอากาศแบบสมบูรณ์ (Full cavitation models) ของการไหล (เสนอโดย Singhal และ คณะ[67] ในปี ค.ศ. 2002) จะถูกนำมาใช้ในการจำลองปรากฏการณ์เกิดโพรงอากาศผ่านค่าความดันไอ (Vapor pressure) และ อัตราการเกิดโพรงอากาศ (Cavitation rate) ในการไหลของของน้ำและอากาศ ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ข้อสมมติฐานนี้ไม่ถูกต้องนักเนื่องจากน้ำจะต้องเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามหากทำเช่นนั้น ระบบสมการและการแก้คำตอบจะซับซ้อนมาก ดังนั้น เพื่อลดตัวแปรและปัญหาดังกล่าว จึงจำเป็นต้องนิยามปัญหาให้ง่ายขึ้นต่อการหาคำตอบโดยให้น้ำระเหยกลายเป็นอากาศ อีกทั้งคุณสมบัติของไอน้ำและอากาศ สามารถยอมรับแทนกันได้

แบบจำลองปรากฏการณ์เกิดโพรงอากาศแบบสมบูรณ์ จะพิจารณาทุกอิทธิพลอันดับที่หนึ่งของการเกิดโพรงอากาศที่มีต่อการไหลของของไหล ได้แก่ การเปลี่ยนสถานะ (Phase change) การเคลื่อนที่ของฟองอากาศ (Bubble dynamics) การเปลี่ยนแปลงความดันปั่นป่วน (Turbulent pressure fluctuations) ก๊าซที่ไม่กลั่นตัว (Non-condensable gases) โดยของไหลจะนิยามให้เป็นของผสมที่

ประกอบด้วย ของเหลว ไอ และก๊าซที่ไม่กลั่นตัว ซึ่งความหนาแน่นของไหลจะเป็นฟังก์ชันของ สัดส่วนมวลของไอ f ซึ่ง สามารถคำนวณได้จากสมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัม ควบคู่กับ สมการส่งถ่ายของไอดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m f) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_{v,i} f) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\gamma \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) + R_e + R_c \quad (3.19)$$

ณ ที่นี้ ρ_m คือ ความหนาแน่นของของผสม u_v คือ เวกเตอร์ความเร็วของไอ γ คือ สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนสถานะ (Effective exchange coefficient)

R_e และ R_c คือ อัตราการเกิดไอ (Vapor generation rate) และอัตราการกลั่นตัว (Condensation rate) ตามลำดับ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ตามสมการ (3.20) และ (3.21) ตามเงื่อนไขความดันของของไหล p ดังนี้

เมื่อ $p < p_v$,

$$R_e = C_e \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p_v - p)}{3p_l}} (1 - f_v - f_g) \quad (3.20)$$

เมื่อ $p > p_v$,

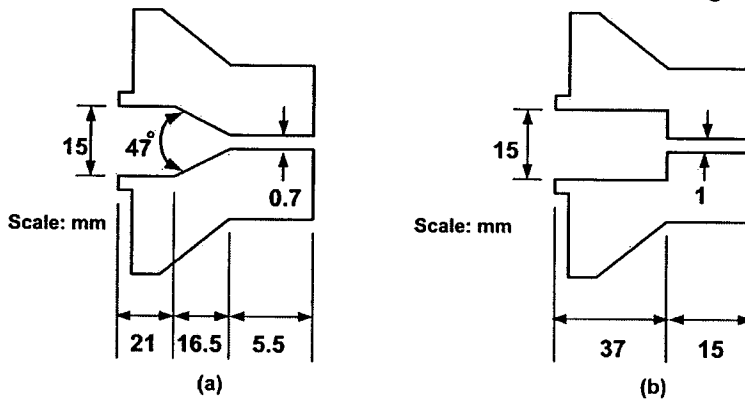
$$R_c = C_c \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_l \sqrt{\frac{2(p - p_v)}{3p_l}} f_v \quad (3.21)$$

ทั้งนี้ C_e และ C_c คือ ค่าคงที่จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.02 และ 0.01 ตามลำดับ k คือ ค่าพลังงานจลน์ปั่นป่วน σ คือ สัมประสิทธิ์แรงตึงผิว (Surface tension coefficient) ของของไหลในสถานะของเหลว โดยตัวอักษรห้อย l, v และ g คือ ของเหลว ไอ และ ก๊าซที่ไม่กลั่นตัว ตามลำดับ

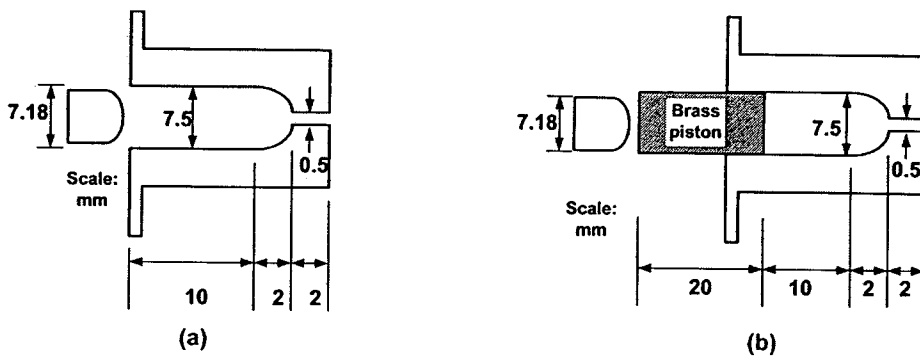
3.2.3 ขอบเขตและรูปร่างของปัญหา

ในเบื้องต้นของการคำนวณปัญหาการไหลของของไหลนั้น จำเป็นต้องยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยเทียบเคียงผลการคำนวณกับผลจากการศึกษาที่ผ่านมา ดังนั้น ใน การศึกษานี้จึงได้นำเอาเงื่อนไขการศึกษาที่ผ่านมา โดยเฉพาะขนาดหัวฉีด ขนาดและความเร็วลูกปืน ของ Pianthong และคณะ [22, 23] Mattujak [5] และ Shi [4, 10] มาใช้ทดสอบพร้อมกับยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง CFD โดยรูปร่างและขนาดหัวฉีด แสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3

รูปที่ 3.2 แสดงขนาดและรูปร่างของหัวฉีดที่ใช้ในการศึกษาของ Pianthong และคณะ [22, 23] Mattujak [5] โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบปาดตรง (Stepped nozzle) และปาดเป็นกรวย (Conical nozzle) ซึ่งมีปริมาตรบรรจุของไหล 4.68 cm^3 และ 6.54 cm^3 ตามลำดับ ขณะที่ รูปที่ 3.3 แสดงรูปร่างหัวฉีดของ Shi [4, 10] โดยมีปาดแบบโค้ง (Parabolic cavity) บรรจุปริมาตรของเหลว 0.42 cm^3 และแบ่งลักษณะการกระแทกออกเป็น 2 แบบ คือ กระแทกและขับโดยตรง (Direct impact) ดังในรูป 3.3(a) และ กระแทกและขับผ่านตัวกลาง (Momentum exchange) ดังในรูป 3.3 (b)

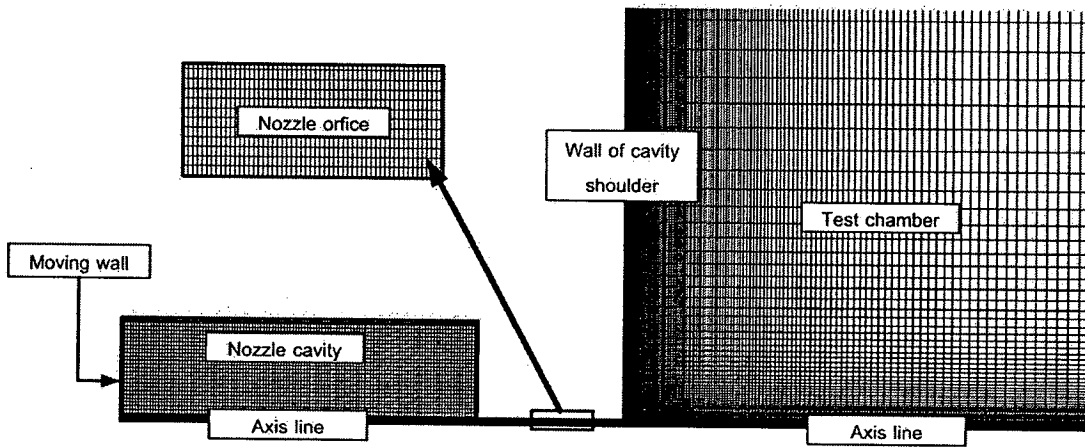


รูปที่ 3.2 ขนาดหัวฉีดแบบ (a) ปาดเป็นกรวย (Conical nozzle) และ (b) ปาดตรง (Stepped nozzle)



รูปที่ 3.3 ขนาดหัวฉีดของ H. H. Shi (a) กระแทกและขับโดยตรง (b) กระแทกและขับผ่านตัวกลาง

จากกลไกการเกิดลำพู่ที่แสดงในหัวข้อ 3.1 และรูปที่ 3.1 สามารถจำลองบนขอบเขตปิด (Closed system domain) ที่สมมาตรตามแนวแกน (Axi-symmetric geometry) และแบ่งพื้นที่ออกเป็นสองส่วน คือ หัวฉีด และห้องทดสอบ ที่เริ่มต้นบรรจุของเหลวและอากาศตามลำดับ ห้องผสมมีขนาด สูง 50 mm และ ยาว 250 mm มีจำนวนกริดประมาณ 60,000 หน่วย ซึ่งจะมีจำนวนคงที่ทุกกรณีศึกษา สังเกตว่ากริดจะหนาแน่นที่แกนกลางของห้องผสม ทั้งนี้เพื่อรองรับการคำนวณปฏิกิริยาที่มีต่อกันระหว่างของเหลวที่ออกจากหัวฉีดกับอากาศ ขณะที่ส่วนหัวฉีด รูปร่างและกริดจะเปลี่ยนแปลง (Moving mesh) ตามการเคลื่อนที่ของลูกปืน ซึ่งจะนิยามให้มีความเร็วเท่ากับความเร็วของผนังด้านซ้ายสุด (Moving wall) ดังแสดงในรูป 3.4



รูปที่ 3.4 กริดและขอบเขตปัญหา

3.2.4 การเปลี่ยนกริดและการเคลื่อนที่ของลูกปืน

การเคลื่อนที่ของลูกปืนในหัวฉีดระหว่างกำเนิดลำพุ่งสามารถกำหนดให้เสมือนการเคลื่อนที่ของผนังและเปลี่ยนกริดภายในหัวฉีด ความเร็วของลูกปืนหลังจากกระแทกของเหลวสามารถคำนวณได้จาก สมการอนุรักษ์โมเมนตัมอย่างง่ายบนลูกปืน จากแรงดันของของเหลวในหัวฉีดตามแนวแกนสมมาตร นั่นคือ

$$\int_{t_0}^t dV = \int_{t_0}^t (F(t)/m) dt \quad (3.22)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วลูกปืน F คือ แรงขับลูกปืน และ m คือ มวลของลูกปืน ซึ่งความเร็วลูกปืน ณ ช่วงเวลา t สามารถแจกแจงและคำนวณด้วยสมการ ออยเลอร์ (Explicit Euler formula) ดังนี้

$$V_t = V_{t-\Delta t} + (F(t)/m)\Delta t \quad (3.23)$$

ความเร็วของการเคลื่อนที่ของลูกปืนหรือผนัง สามารถคำนวณด้วย สมการ (3.23) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ในช่วงเวลา Δt ผ่าน ฟังก์ชันของผู้ใช้ (User Define Function, UDF) ซึ่งโปรแกรม Fluent เปิดช่องทางไว้ให้ ในการคำนวณ มวลลูกปืนมีค่าเท่ากับ 4.2 และ 0.038 กรัม ซึ่งจะเท่ากับการศึกษาของ Pianthong และคณะ [22, 23] Mattujak [5] และ Shi [4, 10] แรงที่กระทำบนลูกปืนกำหนดให้มีเพียงแรงต้านจากแรงดันของเหลวที่กดอัดในหัวฉีด โดยสมมติให้ไม่มีแรงเสียดทานจากผนังของหัวฉีด กรณีกระแทกโดยตรง ความเร็วลูกปืนหรือความเร็วเริ่มต้นของผนังมีค่า

เท่ากับ 300 700 และ 414 m/s ตามงานวิจัยที่ผ่านมา ขณะที่กรณีกระแทกผ่านตัวกลาง ความเร็วของลูกปืนคำนวณจากสมการอนุรักษ์โมเมนตัมของลูกปืนกับแท่งกวด สถานะเริ่มต้นคำนวณกำหนดที่ความดันและอุณหภูมิบรรยากาศทั้งในหัวฉีดและห้องทดสอบ ในบางกรณีที่ลูกปืนเหลือโมเมนตัมจากการขับของเหลวอยู่มาก ลูกปืนจะชนบ่าของหัวฉีดกำหนดให้โมเมนตัมที่เหลือเหล่านั้นจะถูกส่งถ่ายไปยังตัวหัวฉีดจนหมด ดังนั้นความเร็วของลูกปืนจะมีค่าเป็นศูนย์ทันทีทันใดหลังการชน ก่อนที่จะถูกดันกลับด้วยแรงดันจากของเหลวที่โคนอัด และการคำนวณจะสิ้นสุดลงเมื่อลูกปืนเคลื่อนที่กลับมายังจุดเริ่มต้น

3.2.5 คุณสมบัติของของไหล

ที่เงื่อนไขเริ่มต้นของทั้งสองสถานะ ถูกแบ่งให้อยู่หัวฉีดและห้องทดสอบสำหรับของเหลวและอากาศตามลำดับ อากาศกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นก๊าซจิตภาพ (Ideal gas) เพื่อรองรับการไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible flow) เช่นเดียวกันในส่วนของเหลวในหัวฉีด ต้องกำหนดให้มีคุณสมบัติอัดตัวได้ แต่เนื่องจากแตกต่างจากก๊าซ คุณสมบัติสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการอัดตัวได้ของของเหลวได้แก่ ความหนาแน่น และความเร็วเสียงในของเหลว ต้องกำหนดผ่านฟังก์ชันภายนอกโปรแกรม Fluent ที่เขียนขึ้นเองผ่าน UDF โดย คุณสมบัติทั้งสองจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงความดัน ณ ช่วงเวลา ก่อนและหลัง ดังแสดงในสมการ (3.24) และ (3.25) ดังนี้

$$\rho_1 = \frac{\rho_0}{[1.0 - (P_1 - P_0) / B]} \quad (3.24)$$

$$a_1 = \frac{1 - (P_1 - P_0)}{B} \times \frac{\sqrt{B}}{\rho_0} \quad (3.25)$$

ค่า P และ ρ คือ ความดันและความหนาแน่นของของเหลวตามลำดับ ค่าคงที่ B คือ บัลมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของเหลว (Bulk modulus of elasticity) โดยตัวอักษรห้อย 0 และ 1 คือค่าที่สถานะเริ่มต้นและที่เวลานั้นๆ ตามลำดับ การศึกษาที่ใช้ของเหลว 3 ชนิด คือ น้ำ และน้ำมัน ดีเซล โดยมีคุณสมบัติที่สำคัญแสดงดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของของเหลว

| Liquid | Bulk modulus (GPa) | Vapor pressure ($\times 10^{-6}$ GPa) | Molecular weight (g) | Specific heat (J/(kg.K)) | Surface tension coefficient (N/m) |
|--------|--------------------|--|----------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Water | 2.24 | 3.17 | 18 | 4,182 | 0.0717 |
| Diesel | 1.6 | 1.378 | 170 | 1,850 | 0.0244 |

3.2.6 ระเบียบวิธีคำนวณ

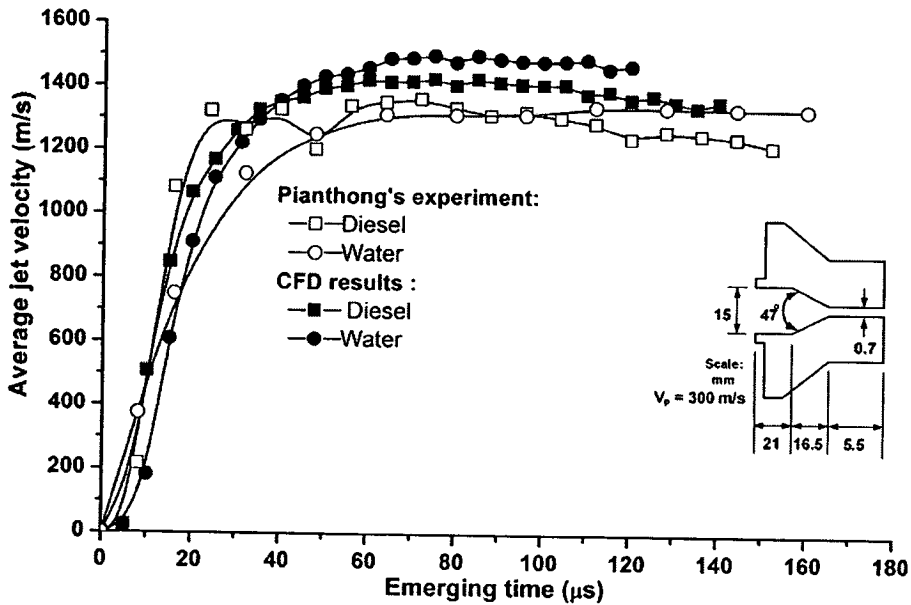
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม CFD สำเร็จรูป Fluent ในการคำนวณแก้ปัญหา สมการควบคุมเชิงอนุพันธ์หาคำตอบจากระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) ด้วยการประมาณค่าจากระเบียบวิธีผลต่างอันดับที่หนึ่ง (First order upwind) บนสมการโมเมนตัม สมการพลังงาน สมการความปั่นป่วน และสมการส่งถ่ายของของผสม สำหรับค่าความดันใช้แบบ Body-force weighted ขั้นตอนวิธีคำนวณสำหรับใช้แบบจำลองเชื่อมต่อกความเร็วและความดัน (Pressure-velocity coupling) แบบ SIMPLE การคำนวณเป็นแบบขึ้นกับเวลา โดยขนาดช่วงเวลา เท่ากับ 10^{-7} วินาที โดยผลคำนวณได้ในแต่ละช่วงเวลาจะถูกบันทึกลงคอมพิวเตอร์

3.3 การยืนยันผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

หัวข้อที่จะนำเสนอต่อไปนี้คือการยืนยันผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของ CFD ด้วยคุณลักษณะพลศาสตร์ของการกำเนิดลำพุ่งความเร็วสูง โดยใช้การเทียบเคียงผลระหว่างผลของแบบจำลองกับผลของการทดลองจากการศึกษาที่ผ่านมา น้ำ น้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด คือ ของเหลวที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบ คุณลักษณะลำพุ่งที่ศึกษา คือ ความดันในหัวฉีด ระยะแหวกอากาศ และความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 - 3.10

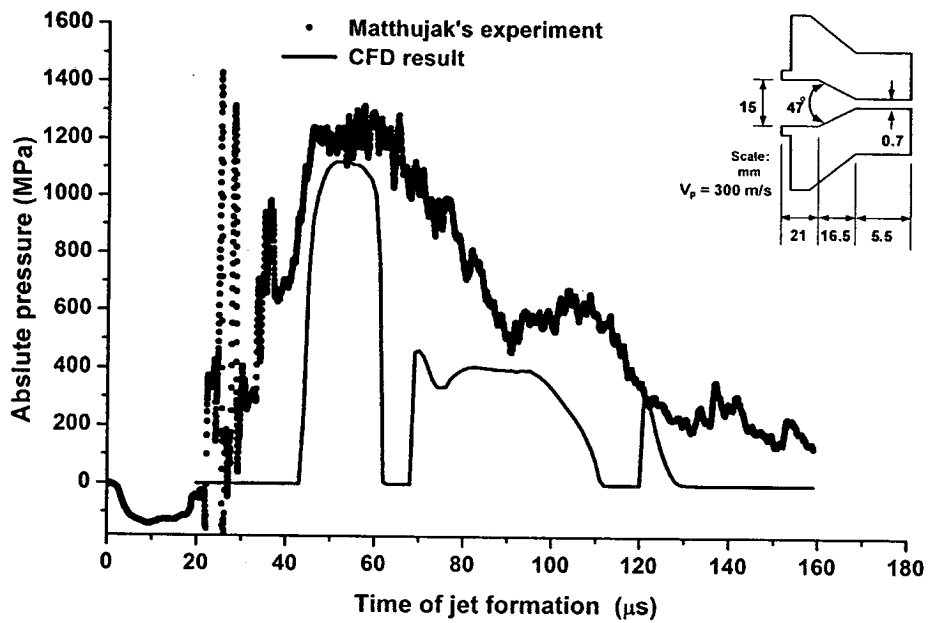
รูปที่ 3.5 แสดง ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย โดยแสดง ผลของ CFD เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Pianthong และคณะ [22, 23] ซึ่งความเร็วลูกปืนมีค่าเท่ากับ 300 m/s กระแทกลงบนหัวฉีดที่มีรูปร่างและขนาดตามรูปที่ 3.2(a) พบว่า ความเร็วแนวโน้มของความเร็วเฉลี่ยของกราฟทั้งสองแตกต่างกันเล็กน้อย ในช่วงเวลา 30 μ s แรก ผลจาก CFD และ การทดลอง มีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อเวลาเดินทางของลำพุ่งเพิ่มขึ้น พบว่าผลจาก CFD มีค่าสูงกว่า การทดลอง อีกทั้งสังเกตเห็นว่า ในช่วงเวลานี้ความเร็วเฉลี่ยจากการคำนวณของน้ำมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากค่าบัลลอคูลัสของสภาพยืดหยุ่นของน้ำสูงกว่าของน้ำมันดีเซล นั้นหมายความว่า ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงของน้ำเนื่องจากการกระแทกของลูกปืนจะสร้าง

ความดันภายในหัวฉีดได้สูงกว่าน้ำมันดีเซล นอกจากนี้แล้วเหตุผลอีกประการ คือ น้ำมันดีเซลมีแรงดึงผิว (Surface tension) น้อยกว่าน้ำ ทำให้การแตกตัวเป็นละอองของลำพุงน้ำมันดีเซลมีมาก (เมื่อเดินทางในอากาศนานขึ้น) ดังนั้นความเร็วจึงลดลงเมื่อเทียบกับน้ำ

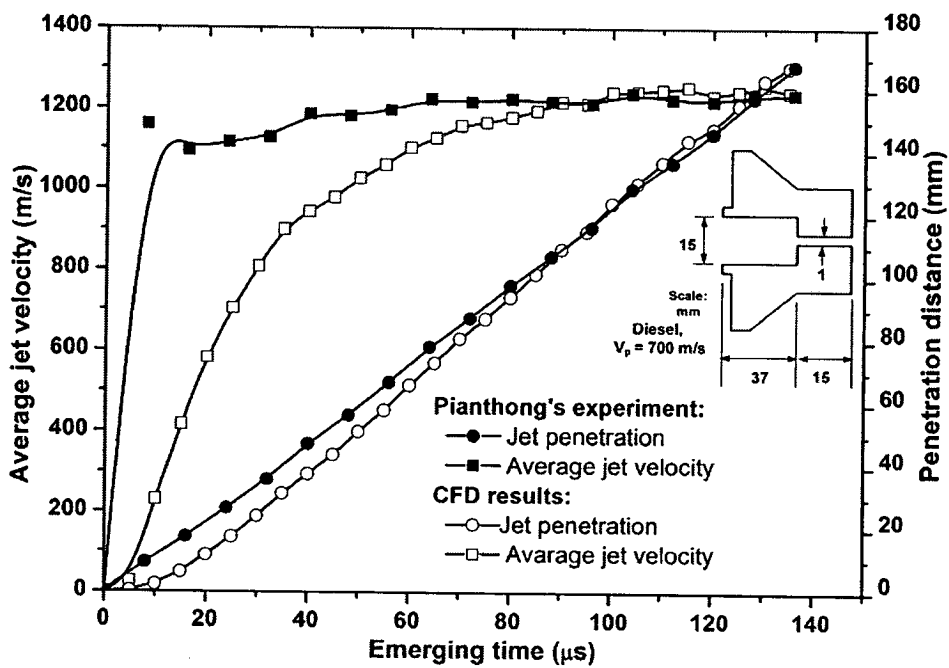


รูปที่ 3.5 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุงจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย

รูปที่ 3.6 แสดงความดันฉีดจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย โดยเปรียบเทียบผลจาก CFD กับการทดลองของ Mattujak [5] ในกรณีนี้ ลูกปืนความเร็ว 300 m/s กระแทกบนน้ำในหัวฉีดบ่าเป็นกรวย จากกราฟความดันที่ทางออกหัวฉีดพบ การขึ้นลงของความดัน ซึ่งเป็ผลที่คล้ายกันของการทดลองและ CFD โดยพบว่าความดันเพิ่มขึ้นและลดลง 3 ครั้ง เนื่องจากการเคลื่อนที่และสะท้อนของ คลื่นช็อค (Shock wave) บนของเหลวในหัวฉีดระหว่างการกำเนิดลำพุง แต่อย่างไรก็ตาม ในช่วงเวลา 20 μs แรก กราฟความดันจาก CFD จึงมีค่าแตกต่างจากการทดลองอยู่มาก เนื่องจากในช่วงนี้ ความดันได้รับอิทธิพลจาก การปล่อยคลื่นช็อคออกมาจากเนื้อวัสดุของหัวฉีด ซึ่งการคำนวณด้วย CFD ไม่สามารถพิจารณาอิทธิของปัจจัยนี้ในแบบจำลองได้ จากการทดลอง ในช่วงกำเนิดลำพุง ความดันขั้วเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุด 3 ค่า คือ 1.24, 0.6 และ 0.27 GPa เช่นเดียวกับผลจาก CFD คือ 1.1, 0.4 และ 0.3 GPa (สังเกตได้จากรูปที่ 3.6) จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่ช่วงห่างของเวลา มีค่าต่างกันอยู่ โดยเฉพาะช่วงความดันที่ 2 และ 3 ผล CFD จะเกิดขึ้นเร็วกว่าการทดลองอยู่ 20 – 30 μs เนื่องจากแบบจำลองการเกิดโพรงอากาศอย่างง่ายที่ใช้ไม่สามารถคำนวณปรากฏการณ์โพรงอากาศขนาดใหญ่ (Supercavitation) ที่เกิดขึ้นในหัวฉีดได้ครอบคลุม จะเห็นได้ว่า บางช่วงเวลาคความดันเป็นศูนย์ระหว่างการกำเนิดลำพุง



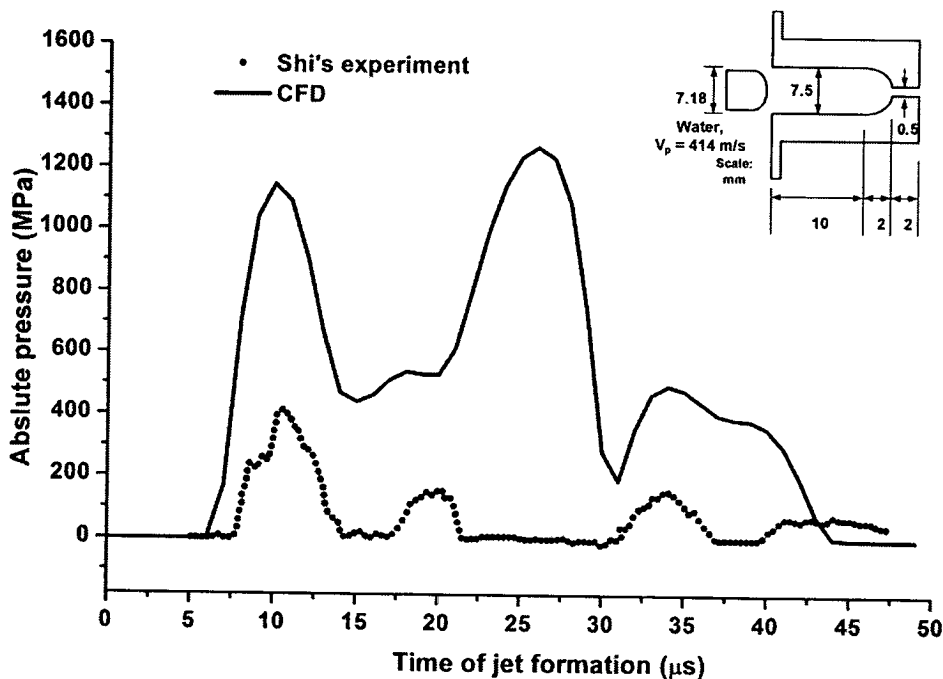
รูปที่ 3.6. ความดันที่เกิดจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย



รูปที่ 3.7 ระยะแหวกอากาศและความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งจากหัวฉีดแบบบ่าตรง

รูปที่ 3.7 แสดง คุณลักษณะของลำพุงในเทอมของระยะแหวกอากาศและความเร็วเฉลี่ยของลำพุงจากการกระแทกบนหัวฉีดแบบบ่าตรง ลูกปืนความเร็ว 700 m/s กระแทกลงบนน้ำมันดีเซลที่บรรจุในหัวฉีดที่มีขนาดและรูปร่างตามรูปที่ 3.2 (b) ซึ่งเป็นเงื่อนไขการศึกษาของ Pianthong [22, 23] พบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงจากการทดลองและ CFD มีแนวโน้มและค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 1,100 m/s ถึงแม้ว่า ความเร็วจากการคำนวณจะมีค่าต่ำกว่าการทดลองบ้างเล็กน้อย จากการสังเกตระยะแหวกอากาศและความเร็วเฉลี่ยของลำพุง ในช่วงเวลาเริ่มแรก 0 ถึง 60 μ s ความเร็วลำพุงจากการทดลองมีค่าสูงกว่าการคำนวณด้วย CFD และการเร่งของลำพุงจนถึงความเร็วสูงสุด ของ CFD จะใช้ช่วงเวลานานกว่าการทดลอง ทั้งนี้อาจจะเกิดขึ้นจาก การปล่อยคลื่นช็อคของเนื้อวัสดุหัวฉีด จากการกระแทกของลูกปืน ซึ่งความเร็วเสียงเดินทางในโลหะเร็วกว่าในของเหลว ส่งผลต่อการกำเนิดลำพุงในช่วงแรก แต่ใน CFD ไม่ได้พิจารณาปัจจัยนี้ในแบบจำลอง

นอกจากการเปรียบเทียบกับรูปร่างหัวฉีดแบบทั่วไปแล้ว การศึกษานี้ยังได้นำเอาแบบจำลองมาคำนวณปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นใน หัวฉีดที่มีลักษณะและวิธีการสร้างลำพุงที่แตกต่างออกไป โดยทำการจำลองการไหลตามเงื่อนไขการศึกษาของ Shi [4, 10] ซึ่งสร้างลำพุงด้วยการกระแทกตรงและผ่านตัวกลาง ตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.2.3 ซึ่งของเหลวในหัวฉีดถูกกระแทกด้วยลูกปืนหนัก 0.384 กรัม เร็ว 414 m/s ผลเปรียบเทียบความดันฉีด และความเร็วเฉลี่ยของลำพุงระหว่าง CFD และ การทดลองแสดงดังรูปที่ 3.8 - 3.10

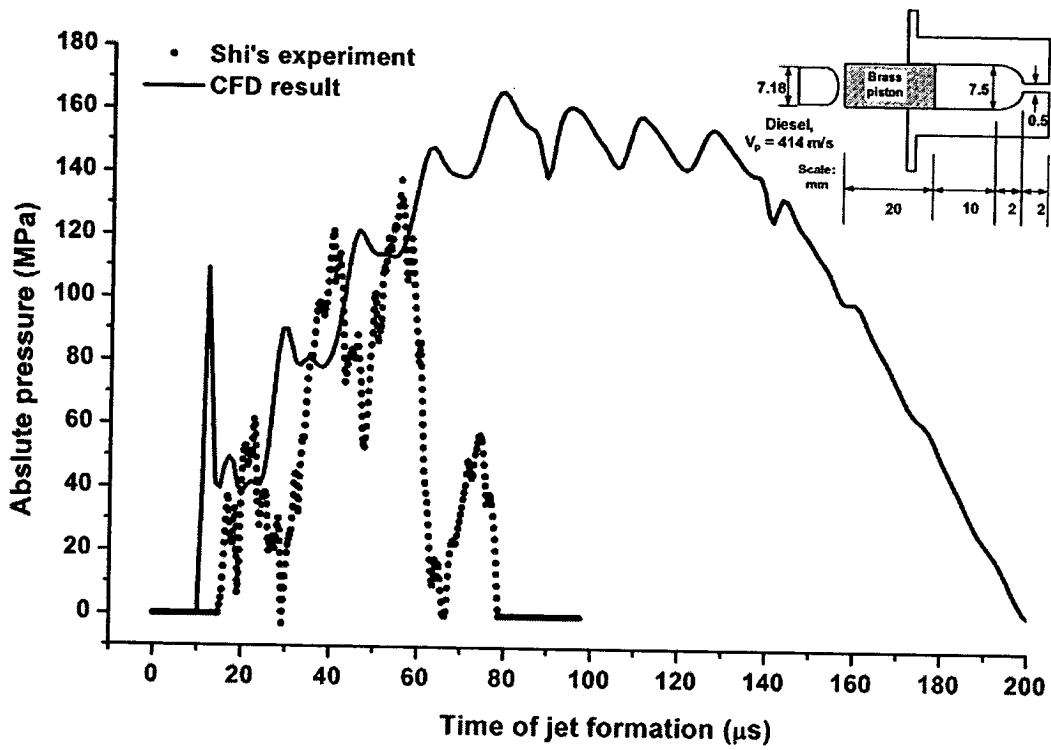


รูปที่ 3.8 ความดันฉีดจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดของ Shi [4, 10]

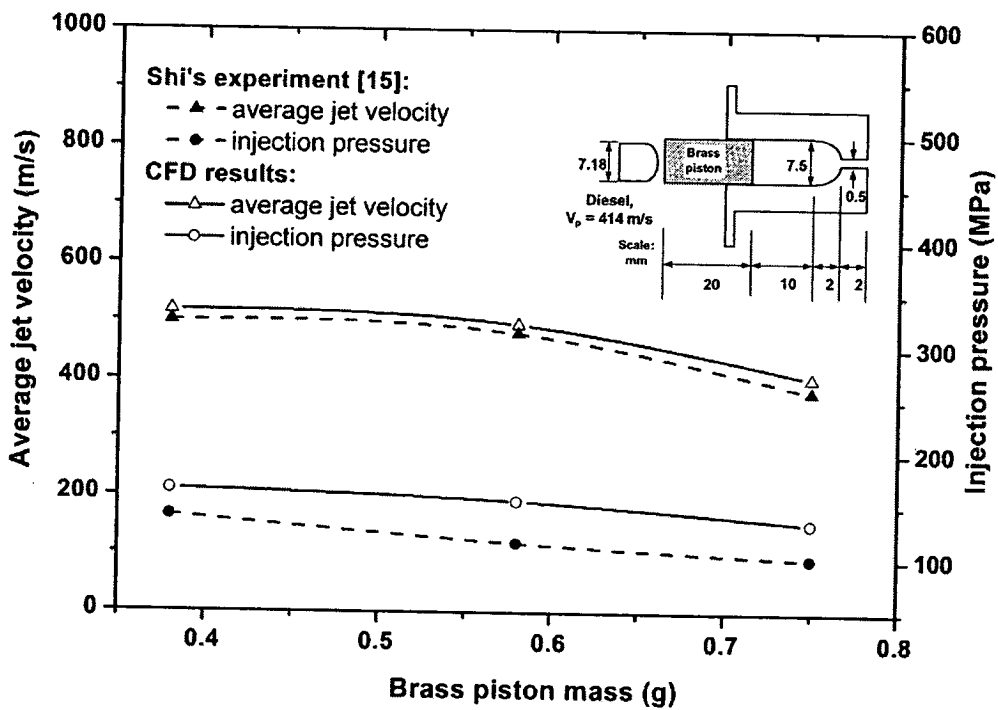
การเปรียบเทียบระหว่างผลของ CFD และการทดลองของ Shi [4, 10] กรณีการกระแทกตรง พบว่าผลที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 แต่อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของการเกิดความดันสูงสุดตามช่วงเวลามีความคล้ายกัน สาเหตุที่ผลต่างกันเนื่องมาจากในแบบจำลอง CFD ขอบเขตเป็นผนังปิดหมดทุกด้าน ดังนั้นการรั่วไหลของของเหลวและการสูญเสียแรงดันที่ด้านข้างของลูกปืนขณะขับลำพุ่ง จึงไม่ได้พิจารณา ซึ่งทำให้ความดันจาก CFD มีค่าสูงกว่าจากการทดลองมาก ซึ่งหาก เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดและลูกปืน ในการทดลองพบว่า มีพบว่ามีช่องว่าง กว้างถึง 0.3 mm (เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด และลูกปืนมีค่าเท่ากับ 7.8 mm และ 7.18 mm ตามลำดับ) นอกจากนี้ การทดลองแต่ละครั้ง การกระแทกของลูกปืนมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้น จากประสิทธิภาพการกระแทกของชุดทดลอง ซึ่งทำให้ผลที่ได้มีความไม่แน่นอนเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอิทธิพลนี้มีผลน้อยมากกับการเคลื่อนที่ของคลื่นช็อคในของเหลว ระหว่างการกำเนิดลำพุ่งสังเกตได้จากจำนวนความดันสูงสุด และช่วงเวลาของการสร้างลำพุ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8

สำหรับการกระแทกผ่านตัวกลาง ในการศึกษาของ Shi ลูกปืนจะกระแทกบนแท่งทองเหลือง เพื่อขับของเหลวในหัวฉีด ความดันฉีดสูงสุดจากการทดลองมีค่าประมาณ 140 MPa ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้ CFD ที่มีค่าประมาณ 160 MPa ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของน้ำหนักรวมของแท่งทองเหลืองที่มีต่อความเร็วเฉลี่ยและความดันฉีดสูงสุด พบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยหากน้ำหนักแท่งกดเพิ่มขึ้น ความเร็วและความดันจะลดลง เนื่องจากการอนุรักษ์โมเมนตัมทำให้ความเร็วแท่งกดลดลง แต่อย่างไรก็ตามผลของ CFD และการทดลองยังมีค่าแตกต่างกันในช่วงเวลากำเนิดลำพุ่ง ซึ่งมีข้อสังเกตว่า ค่าจากการคำนวณยาวนานกว่าการทดลองอยู่สองเท่า เนื่องจากการคำนวณ นิยามให้ลูกปืนและแท่งกดติดกันตลอดระยะเวลาที่ขับของเหลว แต่ในความเป็นจริงหรือในการทดลอง ลูกปืนมีโอกาสที่หลุดออกจากแท่งกดได้ ในช่วงเวลาดังกล่าว ทำให้การถ่ายเทโมเมนตัมมีสั้นลงและด้อยประสิทธิภาพ อีกทั้ง แรงเสียดทานระหว่างแท่งกดและผนังหัวฉีดยังเป็นปัจจัยที่ทำให้ความดันฉีดน้อยลงด้วย นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ของคลื่นช็อคในเนื้อแท่งกดยังส่งผลให้การส่งถ่ายโมเมนตัมจากแท่งกดไปยังของเหลวล่าช้าลงด้วย

จากการเปรียบเทียบผลระหว่าง CFD กับการทดลองที่ผ่านมา พบว่าให้ผลที่ยอมรับได้ถึงแม้จะมีบางกรณีที่ให้ผลแตกต่างกัน แต่ก็เป็นผลที่เกิดขึ้นจาก ปัจจัยของประสิทธิภาพจากการทดลอง และบางปรากฏการณ์ที่ไม่ได้พิจารณาในแบบจำลอง CFD ซึ่งปัจจัยเหล่านี้สามารถอธิบายได้ ดังรายละเอียดที่กล่าวมาทั้งหมด ดังนั้นจึงสามารถที่จะนำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย CFD นี้ ไปใช้ในการคำนวณปรากฏการณ์ ของการกำเนิดลำพุ่งด้วยการกระแทก สำหรับกรณีอื่นๆ ได้



รูปที่ 3.9 ความดันที่เกิดจากการกระแทกผ่านตัวกลางแท่งทองเหลืองบนหัวฉีดของ Shi [4, 10]

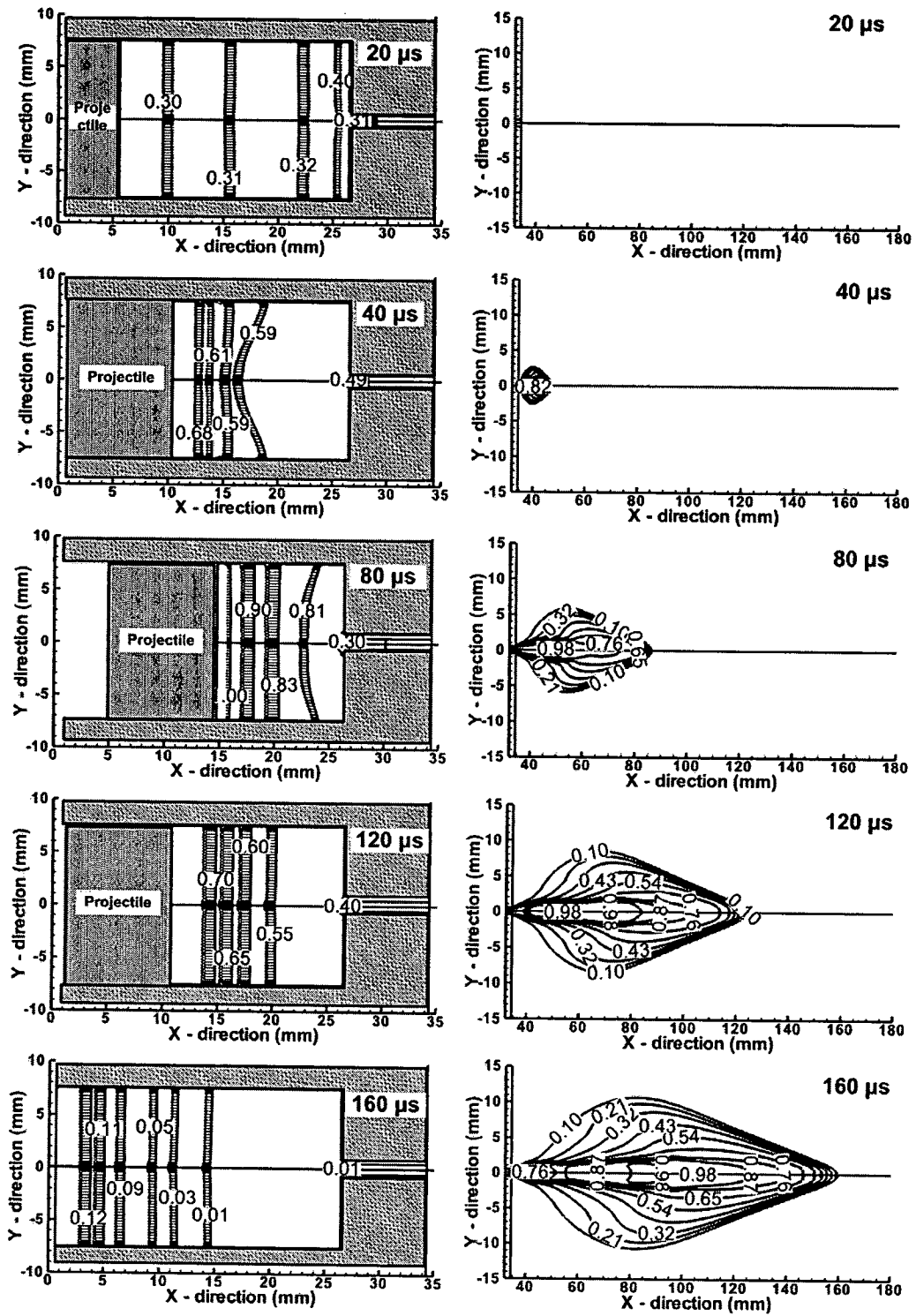


รูปที่ 3.10 อิทธิพลของน้ำหนักแท่งทองเหลืองที่มีต่อความเร็วและความดันสูงสุด

3.4 ผลการศึกษา

3.4.1 รูปแบบการไหลในหัวฉีดและลำพู่

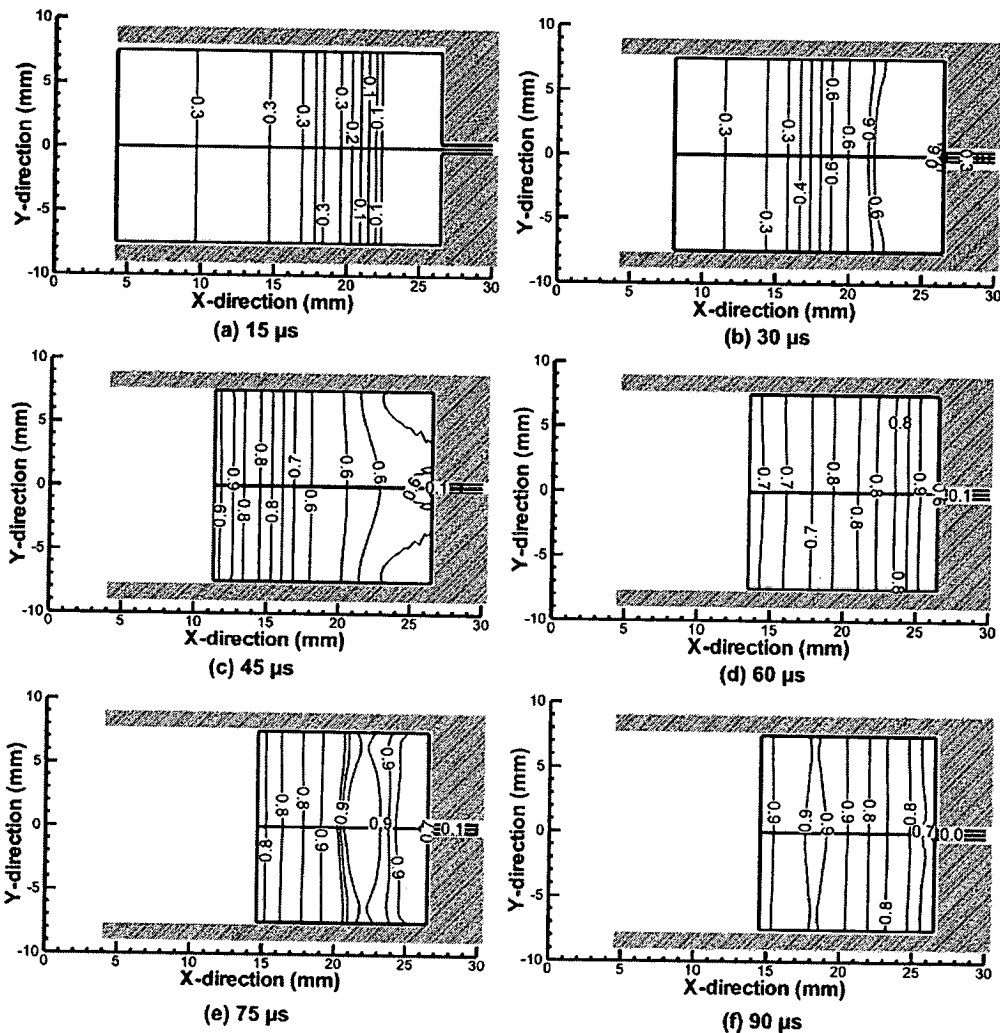
เนื่องจากพฤติกรรมการสะท้อนของคลื่นช็อคกบบนของไหลในหัวฉีดมีอิทธิกับคุณลักษณะของลำพู่ความเร็วสูง ดังนั้น ด้วยการคำนวณจาก CFD ผลที่ได้ทำให้เราเห็นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบความดันในหัวฉีด และความเร็วของลำพู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งการไหลจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบความเร็วของลำพู่กับการเคลื่อนที่ของคลื่นช็อคกในน้ำมันดีเซลที่บรรจุในหัวฉีดแบบบ่าตรง ที่มีปริมาตร 4.68 cm^3 ความเร็วลูกปืน 300 m/s จากรูปแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นและความดันที่เกิดขึ้นจากการกระแทกของลูกปืน ซึ่งพฤติกรรมนี้สอดคล้องกับ การเกิดลำพู่ที่เป็นช่วงๆ (Jet pulses) โดยในช่วง $20 \text{ }\mu\text{s}$ แรกคลื่นที่อยู่ด้านหน้าผนังลูกปืนจะเคลื่อนที่ในแนวแกน x ไปยังคอขวดของหัวฉีด จากนั้นที่เวลา $40 \text{ }\mu\text{s}$ ความดันที่บริเวณใกล้ปากทางออกหัวฉีดเริ่มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสะสมของมวลของเหลวจากคลื่นลำพู่ ซึ่งลำพู่ลูกแรกเกิดขึ้นในช่วงเวลานี้ มีความเร็วประมาณ 820 m/s ที่เวลา $80 \text{ }\mu\text{s}$ เมื่อความดันสูงขึ้นเกินกว่าความดันด้านหน้าลูกปืน จะเกิดคลื่นสะท้อนกลับจากทางออกหัวฉีด และสะสมความดันให้สูงขึ้นถึง 0.68 GPa และสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 1 GPa ณ เวลานี้ ลำพู่ลูกที่สองเริ่มออกจากหัวฉีด ซึ่งมีความเร็วประมาณ 980 m/s ซึ่งสูงกว่าลำพู่ลูกแรก (ดังแสดงในรูปที่ 3.11) ทั้งนี้เนื่องจากความดันฉีดมีค่าสูงกว่าความดันที่เกิดจากคลื่นช็อคกในช่วงเวลาเริ่มแรก ลูกปืนเริ่มเคลื่อนที่กลับเนื่องจากความดันในหัวฉีดที่สูงและการสูญเสียโมเมนตัมให้กับของเหลว ซึ่งหลังจากนี้ความดันจะเริ่มลดลง (สังเกตจากรูปที่ 3.11 ในช่วงเวลา 120 และ $160 \text{ }\mu\text{s}$) ที่เวลา $120 \text{ }\mu\text{s}$ สังเกตว่าก่อนความเร็ว 980 m/s เริ่มออกห่างจากหัวฉีด และยังชัดเจนที่เวลา $160 \text{ }\mu\text{s}$ อันเป็นผลเนื่องจากแรงดันฉีดที่ลดลงนั่นเอง ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องและสามารถนำมาอธิบายการเกิดลำพู่ความเร็วสูงลักษณะเป็นช่วงๆ (Multiple pulses) จากการทดลองของงานวิจัยที่ผ่านมาได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3.11 ระดับความดัน (GPa) ของของเหลวไหลในหัวฉีด และความเร็วของลำพุ่ง (km/s)

3.4.2 พฤติกรรมการไหลในหัวฉีด

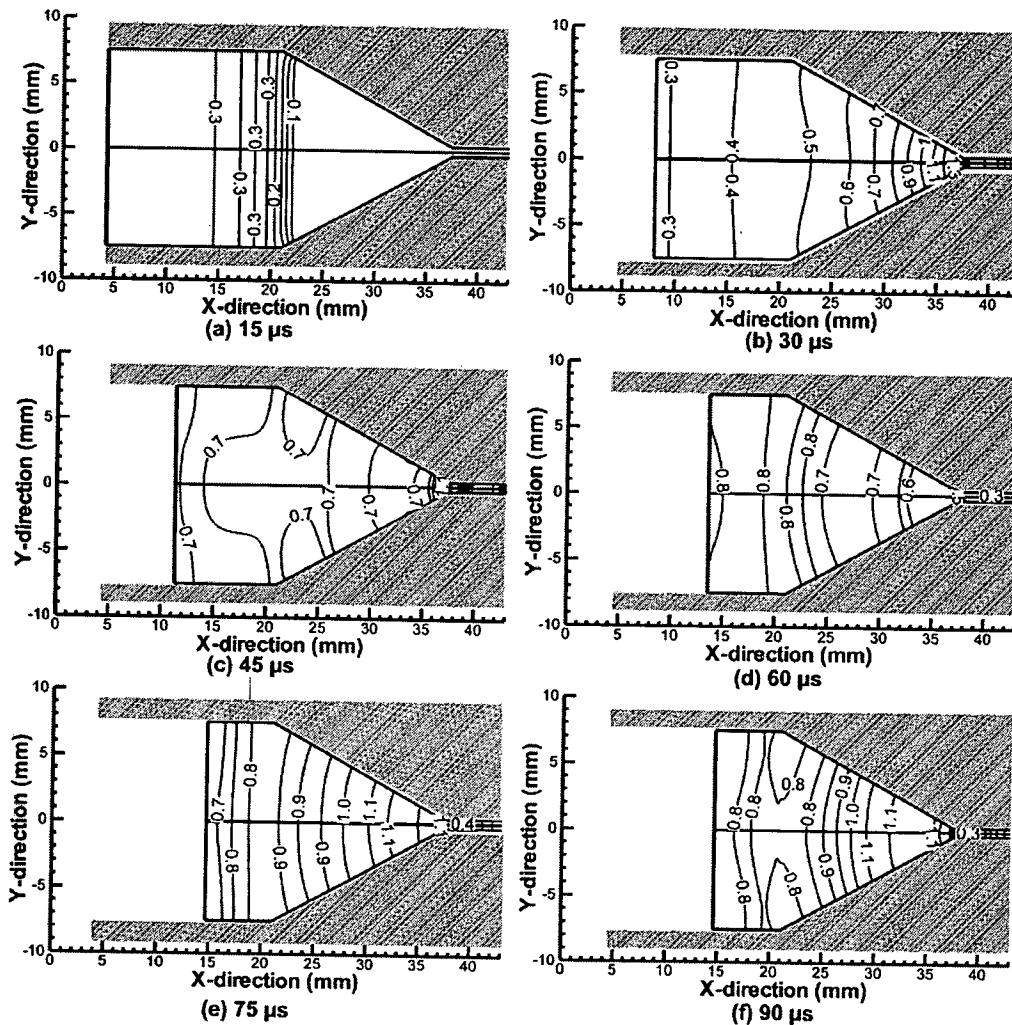
หัวข้อนี้จะเสนอ คุณลักษณะเชิงพลศาสตร์ของกระบวนการกำเนิดลำพุ่งในหัวฉีด จากการคำนวณของ CFD ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ถึงอิทธิพลของการเคลื่อนที่ของคลื่นช็อคในหัวฉีดที่มีต่อคุณลักษณะของลำพุ่ง ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงเสนอพร้อมอธิบายรูปแบบความดันที่เกิดขึ้นในหัวฉีดจากอิทธิพลของรูปร่างหัวฉีดและรูปแบบการขับของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 3.12 - 3.15



รูปที่ 3.12 ระดับความดัน (GPa) ของน้ำมันดีเซลในหัวฉีดแบบบ่าตรง

รูปที่ 3.12 และ 3.13 แสดง ความดันในหัวฉีดแบบบ่าตรงและบ่าเป็นกรวยตามลำดับ จากการกระแทกของลูกปืนความเร็ว 300 m/s บนน้ำมันดีเซลปริมาตร 4.68 cm³ สำหรับหัวฉีดแบบบ่าตรง พบว่าความดันก่อตัวขึ้นสามครั้งที่บริเวณใกล้ปากทางออกหัวฉีด ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนลูกลำพุ่งที่ออกจากหัวฉีด ช่วงแรกที่ 15 μs (รูปที่ 3.12(a)) ความดันบริเวณด้านหน้าหัวฉีดมีค่า 0.3 GPa และลดลงตามระยะที่ห่างออก จากนั่นที่เวลา 30 μs มวลของเหลวเริ่มสะสมและมีความดันสูงขึ้นที่

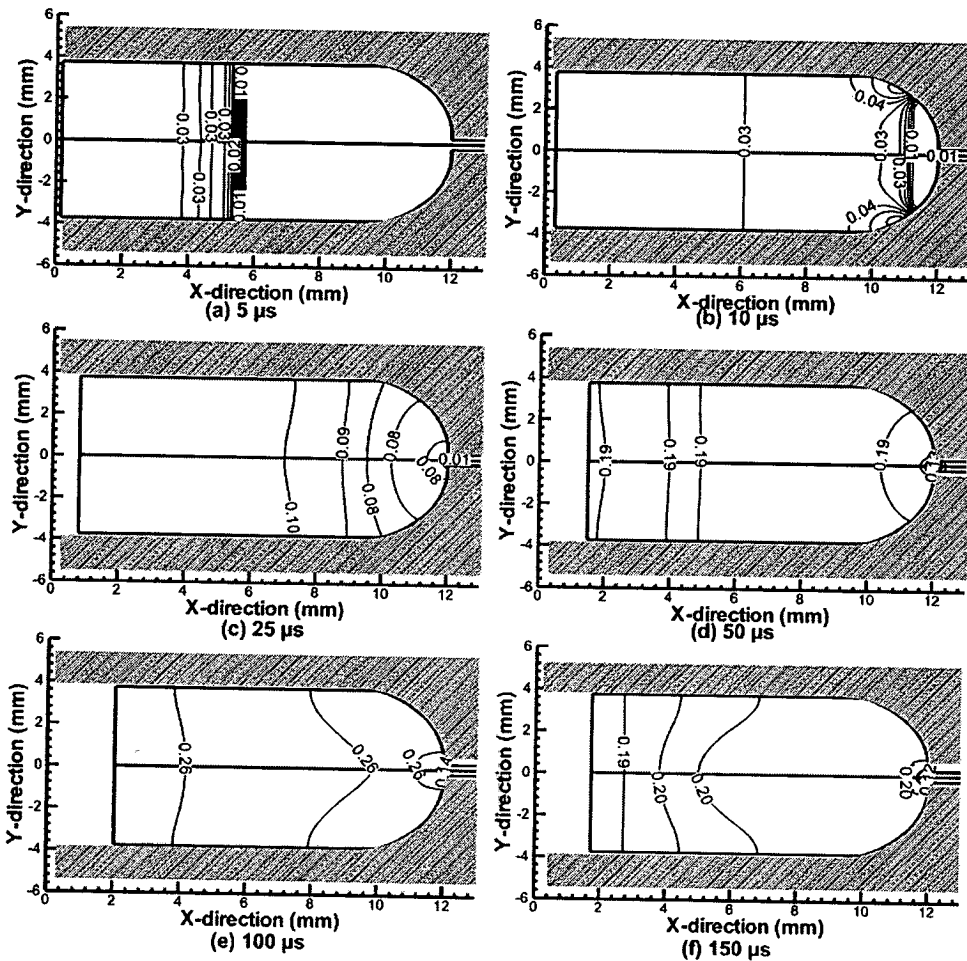
บริเวณใกล้หัวฉีด จนเมื่อมีความดันเกินกว่าที่เกิดขึ้นในช่วงก่อนหน้า คลื่นช็อคเริ่มสะท้อนกลับไปยังผนังลูกปืนพร้อมกับลำพุงลูกแรกถูกขับออกจากหัวฉีด เป็นเหตุให้ความดันที่บริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้น ก่อนสะท้อนกลับไปยังบริเวณบ่าหัวฉีด ด้วยเหตุนี้ความดันขั้วและความเร็วของลำพุงลูกที่สองมีค่าสูงกว่าลูกแรก ดังแสดงในรูปที่ (รูปที่ 3.12(b) ถึง 3.12(f)) ซึ่งหลังจากนี้ลูกปืนจะเริ่มเคลื่อนที่กลับเนื่องจากโมเมนตัมถูกถ่ายเทให้ของเหลวทั้งหมด และความดันของเหลวที่สูงขึ้น



รูปที่ 3.13 ระดับความดัน (GPa) ของน้ำมันดีเซลในหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย

จากการศึกษาด้วยการคำนวณ CFD พบว่ารูปแบบการไหลและค่าความดันของของเหลวในหัวฉีดแบบบ่าตรงและบ่าเป็นกรวย มีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากรูปร่างที่ทางเข้าหัวฉีดแตกต่างกัน ซึ่งการไหลในหัวฉีดแบบบ่าเป็นกรวย แสดงในรูปที่ 3.13 พบว่าในช่วงเวลาแรก (รูปที่ 3.13(a)) คลื่นช็อค ไหลเข้าทางออกหัวฉีดเสมือนปรากฏการณ์การไหลในท่อคู่ข้าวของก๊าซความดันสูง ทำให้ความดันสะสมของลำพุงลูกแรกมีค่าสูงที่สุด ซึ่งหลังจากนั้นความดันในหัวฉีดจะลดลงเนื่องจาก

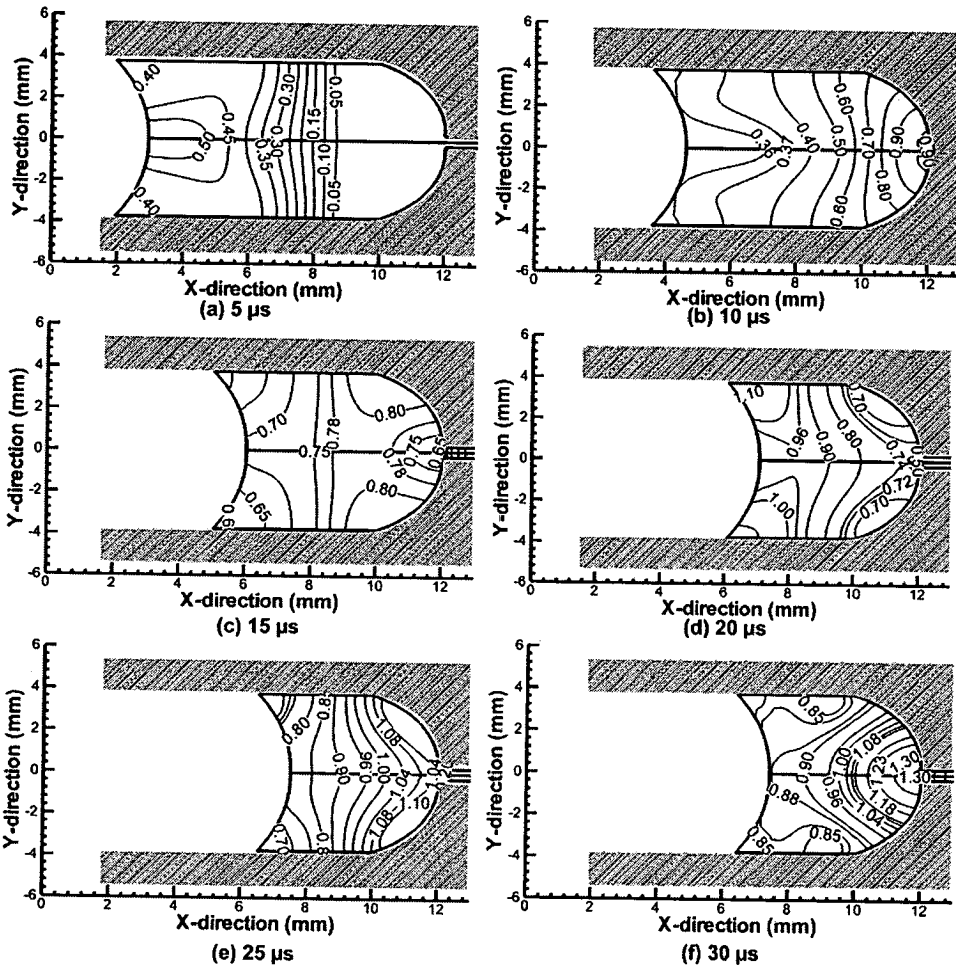
การปล่อยไหลออก (แสดงในรูปที่ 3.13(c)) ถึงแม้ลูกปืนยังคงเคลื่อนที่เข้าหาบ่าของหัวฉีด ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะต่างออกไปจากหัวฉีดแบบบ่าตรงที่ความดันฉีดสูงสุดจะเกิดกับลำพุงลูกปืนเนื่องจากในหัวฉีดแบบบ่าตรง การลดของความดันใกล้ทางออกหัวฉีดเพื่อกำเนิดลำพุงลูกปืนแรก ลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งทำให้ทำคั้นลูกทำให้สูงขึ้นได้อีก จากการเคลื่อนที่กลับมาของคลื่นช็อคก็ แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าลำพุงลูกปืนที่สามเกิดขึ้นในช่วงที่ลูกปืนเคลื่อนที่กลับแล้ว



รูปที่ 3.14 ระดับความดัน (GPa) ของน้ำมันดีเซลในหัวฉีดของ Shi แบบกระแทกผ่านตัวกลาง

รูปที่ 3.14 และ 3.15 แสดงรูปแบบการไหลในหัวฉีดรูปร่างบ่าโค้งของ Shi จากวิธีการกระแทกผ่านตัวกลางและกระแทกตรง ตามลำดับ โดยความเร็วลูกปืน 414 m/s หัวฉีดบรรจุน้ำมันดีเซล พบว่าวิธีการวิธีการกระแทกผ่านตัวกลาง (แสดงในรูป 3.14) มีความดันขั้วต่ำกว่าแบบกระแทกตรง อีกทั้งความดันสะสมเพิ่มขึ้นค่อนข้างช้า การเคลื่อนที่ของคลื่นไม่ชัดเจน (สอดคล้องกับผลในรูปที่ 3.9) และที่สำคัญพบว่าระยะกคของลูกปืนบนน้ำมันดีเซลสั้นมาก ประมาณ 1.8 mm เนื่องจาก โมเมนตัมบางส่วนจากลูกปืนยังคงเหลืออยู่ภายในแท่งกคแทนที่จะถูกส่งถ่ายเทให้กับ

ของเหลวทั้งหมด และความดันของเหลวค่อนข้างต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม โมเมนต์รวมของลูกปืนกับแท่งกด ยังคงมีค่าเท่ากับกรณีการกระแทกตรงทำให้ต้องใช้เวลานานขึ้นเพื่อถ่ายเทไปยังของเหลว ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความเร็วและความดันฉีกของลำพุ่งลดลง เมื่อมวลหรือความยาวแท่งกดเพิ่มขึ้น ตามรูป 3.10

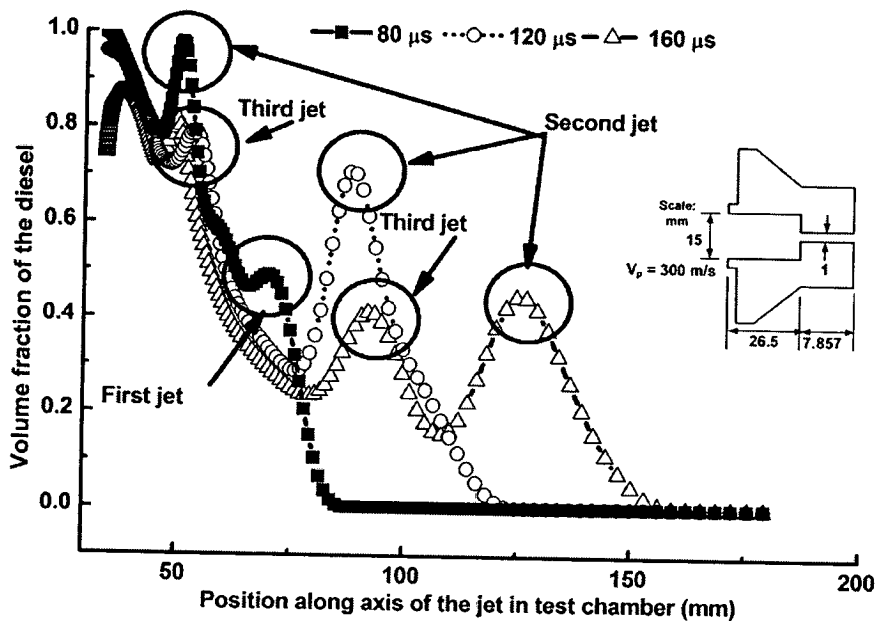


รูปที่ 3.15 ระดับความดัน (GPa) ของน้ำมันดีเซลในหัวฉีกของ Shi จากการกระแทกตรง

สำหรับกรณีการกระแทกตรง การไหลในหัวฉีกแสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งจะมีความแตกต่างจากกรณีการกระแทกผ่านตัวกลางอยู่มาก กล่าวคือ สามารถสังเกตเห็นการกระจายความดันในระหว่างการกำเนิดลำพุ่งและการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากบ่าที่เป็นลักษณะโค้ง ทำให้เกิดการสะท้อนและประทะกันของคลื่นจนรูปแบบการเคลื่อนที่ไม่แน่นอน การกระแทกโดยตรงบนของเหลว ทำให้โมเมนต์ถูกถ่ายเทอย่างรวดเร็วทำให้ของเหลวมีความดันฉีกสูง รูปแบบการไหลคล้ายกับกรณีหัวฉีกแบบบ่าตรงที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ แต่ก็มีรูปแบบความดันที่แตกต่างกันเนื่องจากรูปร่างของบ่าที่ทางออกหัวฉีก

3.4.3 การเปลี่ยนสถานะของลำพู่

โดยปกติการแตกตัวเป็นละออง (Breaking up) ของของเหลวจะเกิดขึ้นเสมอ เมื่อลำพู่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว เนื่องจากแรงเฉือนระหว่างผิวของของเหลวกับอากาศทำให้แตกเป็นละอองขนาดเล็ก ก่อนจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอหรือก๊าซ ด้วยการระเหย (Vaporization) กรณีลำพู่ความเร็วสูงที่กำเนิดจากการกระแทกก็เช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยผลการคำนวณ CFD ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งเป็นสัดส่วนปริมาตรตามแนวแกนของน้ำมันดีเซลที่เวลา 80 120 และ 160 μs ของลำพู่ที่กำเนิดจากการกระแทกตรงบนหัวฉีดแบบบ่าตรง พบว่าสัดส่วนของเหลวมีลักษณะเพิ่มขึ้นสูงต่ำ (Pulse) 3 ครั้ง สอดคล้องกับปรากฏการณ์ในหัวฉีดที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4.1 จากรูปที่ 3.16 ช่วงเวลา 80 μs แรกจะสังเกตเห็นลำพู่ลูกแรกและลูกสองอย่างชัดเจน โดยลูกที่สองจะอยู่ใกล้หัวฉีดและมีสัดส่วนปริมาตรเท่ากับหนึ่งหรือยังคงเป็นของเหลวอยู่ ขณะที่ ลูกแรกจะอยู่ห่างหัวฉีดและปริมาตรบางส่วนเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซแล้ว จากการแตกตัวเป็นละอองและระเหยเป็นไอ แรงเฉือนบนผิวของเหลวสูงขึ้น จากการปะทะกับอากาศ ในห้องทดสอบ ดังนั้นสัดส่วนปริมาตรของเหลวจึงลดลง เมื่อลำพู่เคลื่อนที่ออกห่างจากหัวฉีด และใช้เวลาเดินทางมากขึ้น ดังแสดงในช่วงเวลา 120 μs และ 160 μs ซึ่งพบว่าลำพู่ลูกแรกได้หายไปแล้วเพราะการเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซจนหมด ขณะที่ลูกที่สองและสามมีสัดส่วนของเหลวน้อยลง



รูปที่ 3.16 สัดส่วนปริมาตรของเหลวตามแนวแกน

3.4.4 อิทธิพลของพารามิเตอร์ที่มีต่อลำพุ่งความเร็วสูง

หัวข้อนี้จะเป็นการอภิปรายคุณลักษณะของการกำเนิดลำพุ่ง ที่เป็นผลจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางคอกชอด ความยาวท่อหัวฉีด ความยาวคอกชอด ความหนาแน่นและความเร็วของลูกปืน โดยจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ภายในหัวฉีดกับการกำเนิดลำพุ่ง ด้วยค่าความดันและความเร็วที่ตำแหน่งทางเข้าคอกชอดและทางออกหัวฉีดตามลำดับ ในการศึกษาใช้หัวฉีดแบบบ่าตรงที่มีขนาดพื้นฐาน ดังนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 1 mm ท่อหัวฉีดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm ยาว 26.5 mm คอกชอดยาว 7.857 ลูกปืนหนัก 4.2 g มีความเร็ว 300 m/s กระแทกบนน้ำมันดีเซล ซึ่งค่าเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงเฉพาะกรณีที่ต้องการศึกษาพารามิเตอร์นั้น ๆ โดยกำหนดให้ค่าอื่นคงที่ไว้

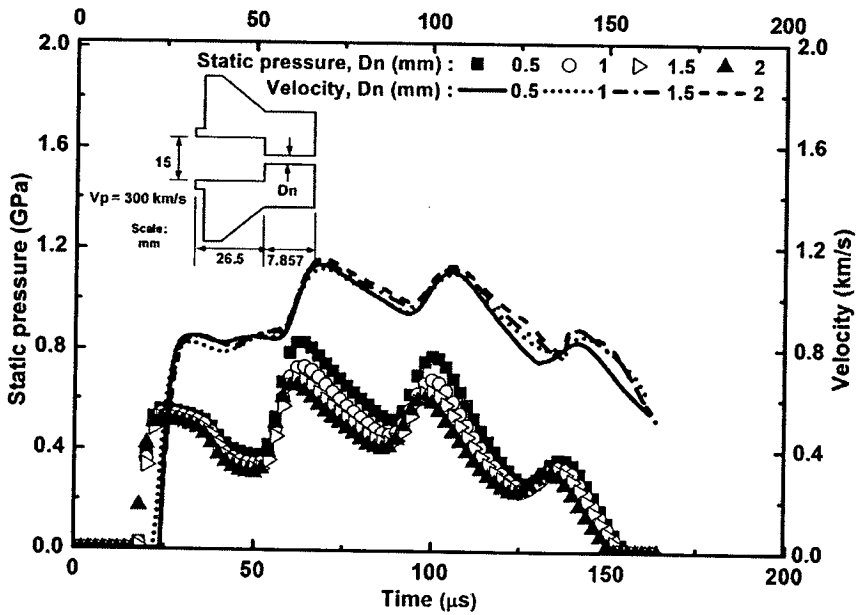
1) เส้นผ่านศูนย์กลางคอกชอด

เป็นที่ทราบกันดีว่าเส้นผ่านศูนย์กลางคอกชอดเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลกับการฉีดของลำพุ่ง ดังนั้นในหัวข้อนี้ จึงจะเสนอการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ดังกล่าวด้วย CFD โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอกชอด ดังนี้ 0.5 1.0 1.5 และ 2 mm ขณะที่ค่าอื่นกำหนดให้คงที่ ผลที่ได้ในเทอมของความดันและความเร็วที่ตำแหน่งทางเข้าคอกชอดและทางออกหัวฉีด แสดงดังรูปที่ 3.17 พบว่าความดันในหัวฉีดถูกสร้างขึ้นในลักษณะเป็นช่วงๆ อันเป็นผลจากการเคลื่อนที่และสะท้อนของคลื่นชอคกบนน้ำมันดีเซล ในหัวฉีด ซึ่งทำให้ความเร็วที่ปากทางออกหัวฉีดมีลักษณะเป็นช่วงๆ เช่นกัน สอดคล้องกับรายละเอียดที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา โดยค่าสูงสุดจะเกิดที่ช่วงที่สอง และทั้งสามช่วงของความดันและความเร็วจะต่างกันอยู่ประมาณ 5 μ s เหมือนกันทุกกรณี เส้นผ่านศูนย์กลางคอกชอดมีผลกับแนวโน้มของกราฟความเร็วเพียงเล็กน้อย และดูเหมือนไม่เปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลา 100 μ s แรก แม้ว่าความดันฉีดจะสูงขึ้นในช่วงที่สองและสาม เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงเนื่องอัตราการเกิดโพรงอากาศขณะกำเนิดลำพุ่ง และการแตกตัวเป็นละออง มีมากขึ้นเมื่อของเหลวความดันสูงไหลผ่านช่องคอกชอดขนาดเล็ก นอกจากนี้ ดูเหมือนว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้จะมีขนาดโตไม่เพียงพอที่จะมีผลกับการไหลของลำพุ่ง

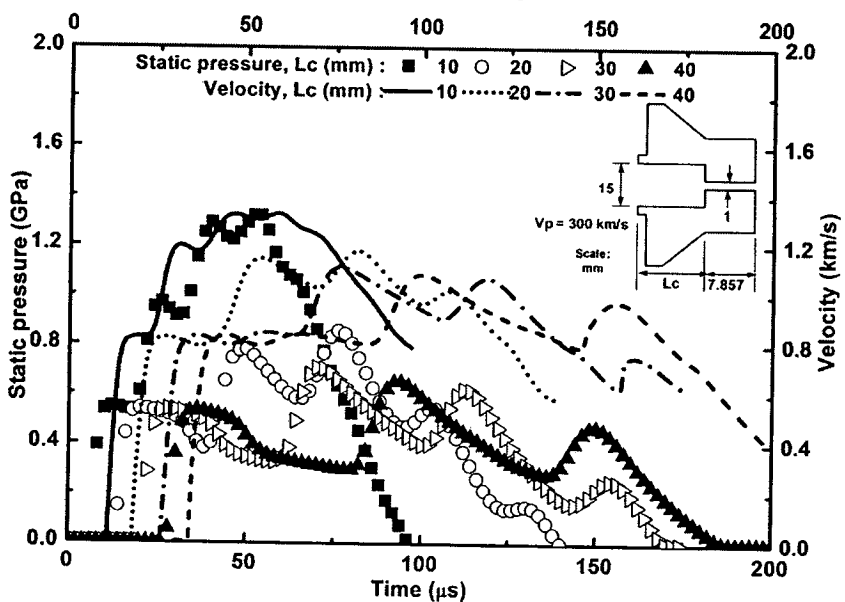
2) ความยาวของท่อหัวฉีด

การเปลี่ยนความยาวของท่อหัวฉีดใน CFD ช่วยศึกษาอิทธิพล ของความถี่ในการสะท้อนคลื่นชอคกในหัวฉีด และปริมาตรบรรจุของไหลที่มีต่อความดันฉีดและการไหลของลำพุ่ง ความยาวที่ใช้ คือ 10 20 30 และ 40 mm เส้นผ่านศูนย์กลางคอกชอด 1 mm และ ลูกปืนมีความเร็ว 300 m/s รูปที่ 3.18 แสดง การเปลี่ยนแปลงความดันฉีดและความเร็วลำพุ่ง จากความยาวท่อหัวฉีดขนาดต่างๆ พบว่าลำพุ่งลูกที่สามของหัวฉีดที่มีท่อสั้นสุด 10 mm มีความเร็วสูงสุดประมาณ 1300 m/s ที่ความดันฉีด 1.3 GPa เนื่องจากความยาวท่อที่เพิ่มขึ้นทำให้กระบวนการกำเนิดลำพุ่งเพิ่มใช้เวลานานขึ้น

ความดันฉีกจึงลดลงสอดคล้องกับความเร็วย้าย แต่นำแปลกที่ไม่พบว่าลูกปืนกระแทกบ่าหัวฉีกถึงแม้ที่จะสั้นลงมากก็ตาม เพราะความดันของน้ำมันดีเซลที่สูงขึ้นนั่นเอง อีกประการที่เกิดปรากฏการณ์ที่น่าสนใจ คือ เราพบว่าเกิดลำพุ่งขึ้นสี่ลูก ทุกกรณี เพราะโมเมนตัมของลูกปืนเท่ากัน ที่ถูกถ่ายทอดให้กับของเหลว เมื่อท่อหัวฉีกที่ยาวทำให้กระบวนการสร้างลำพุ่งกินเวลานานขึ้น หมายความว่าคลื่นช็อคต้องเดินทางเป็นระยะไกลขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ปริมาตรบรรจุที่เพิ่มขึ้นเท่ากับมีมวลจำนวนมากช่วยดูดซับพลังงานจากลูกปืน ดังนั้นกระบวนการจึงต้องใช้เวลานานขึ้นเพื่อลดพลังงานการกระแทกของลูกปืนลง



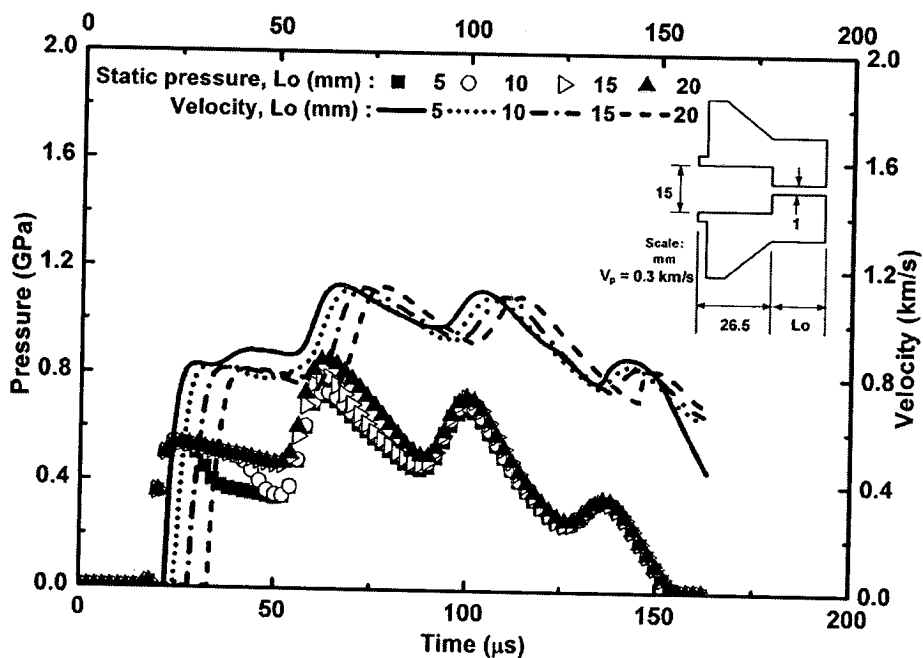
รูปที่ 3.17 ความดันฉีกและความเร็วกับเส้นผ่านศูนย์กลางคอขวดที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.18 ความดันฉีกและความเร็วกับความยาวของท่อหัวฉีกที่เปลี่ยนแปลง

3) ความยาวคอขวด

เนื่องจากการไหลผ่านคอขวดมีผลโดยตรงกับคุณลักษณะการฉีด ซึ่งการศึกษานี้ก็ได้พยายามศึกษาผลกระทบของรูปร่างคอขวดเช่นกัน ด้วยการเปลี่ยนความยาวคอขวด จาก 0.5 mm ถึง 20 mm และกำหนดพารามิเตอร์อื่นให้คงที่ เพื่อศึกษาอิทธิพลของความยาวคอขวดที่มีต่อการกำเนิดและคุณลักษณะลำพุ่ง ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.19 พบว่าเมื่อ คอขวดมีความยาวเพิ่มขึ้น ลำพุ่งจะถูกขับล่าช้าลงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามพบว่า แนวโน้มของกราฟความเร็วแตกต่างกันน้อยมาก แม้ช่วงเวลาลำพุ่งจะยาวขึ้นและความดันขับในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้น เมื่อคอขวดมีความยาวเพิ่มขึ้นก็ตาม อีกทั้งความเร็วสูงสุดเกิดขึ้นที่ลำพุ่งลูกที่สองเหมือนกันทุกกรณี หลังจากลำพุ่งลูกแรก และลูกที่สองพบว่าแนวโน้มของกราฟความดันไม่ขึ้นกับความยาวคอขวด ที่ความยาว 5 และ 10 mm กราฟความดันในช่วงเวลา 20 - 80 μs มีความแตกต่างจากกรณีความยาวอื่น (แต่ช่วงเวลานั้นแตกต่างกันน้อยมาก) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของลำพุ่งให้มีความเร็ว ออกจากหัวฉีดส่งผลให้ความดันในคอขวดลดลงเล็กน้อย เพราะระยะของบ่าหัวฉีดใกล้กับทางออกนั่นเอง

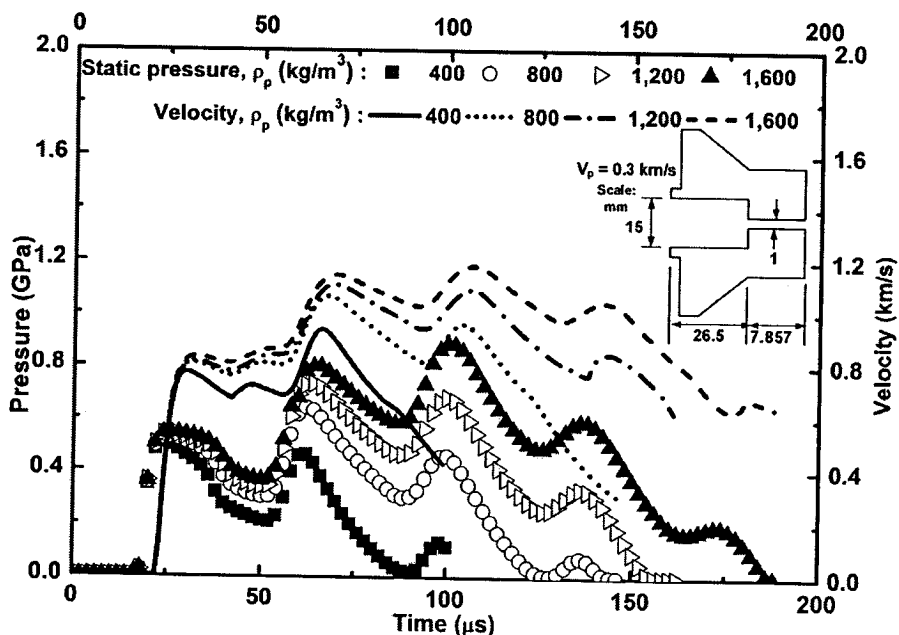


รูปที่ 3.19 ความดันฉีดและความเร็วกับความยาวของคอขวดที่เปลี่ยนแปลง

4) ความหนาแน่นของลูกปืน

การกระแทกลูกปืนบนของเหลวเพื่อขับของเหลวให้ฉีดเป็นลำพุ่ง น้ำหนักลูกปืนเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่าง ที่จะกำหนดลักษณะลำพุ่ง เนื่องจากเป็นค่าบ่งชี้ระดับพลังงานจลน์ที่จะใช้สร้างความดันฉีดให้กับการขับลำพุ่ง แต่อย่างไรก็ตาม การทดลองที่ผ่านมา ยังไม่มีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวอย่างจริงจัง ดังนั้นการศึกษานี้จึงเป็นครั้งแรกที่จะได้นำเสนอผลกระทบของน้ำหนักลูกปืน

ที่มีต่อการกำเนิด และคุณลักษณะของลำพุ่ง เพื่อให้ง่ายต่อการประยุกต์ใช้งานจริง กำหนดให้รูปร่าง และปริมาตรของลูกปืนคงที่ หมายความว่า การเปลี่ยนน้ำหนักลูกปืนมีผลโดยตรงกับความหนาแน่น ของลูกปืนนั้น ซึ่งในการปฏิบัติจริง สามารถปรับด้วยการเปลี่ยนชนิดวัสดุของลูกปืน ในการศึกษา นี้ ใช้ความหนาแน่นของลูกปืน 400 800 1200 และ 1600 kg/m³ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.20 พบว่า ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วและลำพุ่งเพิ่มขึ้น ขณะที่เวลาของกระบวนการสร้างลำพุ่ง เพิ่มขึ้นด้วย ความเร็วและความดันสูงสุดที่พบมีค่าเท่ากับ 1200 m/s และ 0.9 GPa ตามลำดับ ที่กรณี ความหนาแน่นสูงสุด (1600 kg/m³) และพบว่าความหนาแน่นของลูกปืนมีผลโดยตรงกับแนวโน้ม ของกราฟความดันและความเร็ว ซึ่งเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น พลังงานจลน์ของลูกปืนจะมีมาก ส่งผลให้ช่วงเวลาของกระบวนการกำเนิดลำพุ่งยาวขึ้น และการถ่ายเทโมเมนตัมมีมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ ความดันฉีดและความเร็วของลำพุ่งสูงขึ้น ที่ความเร็วกระแทกของลูกปืนเท่ากัน

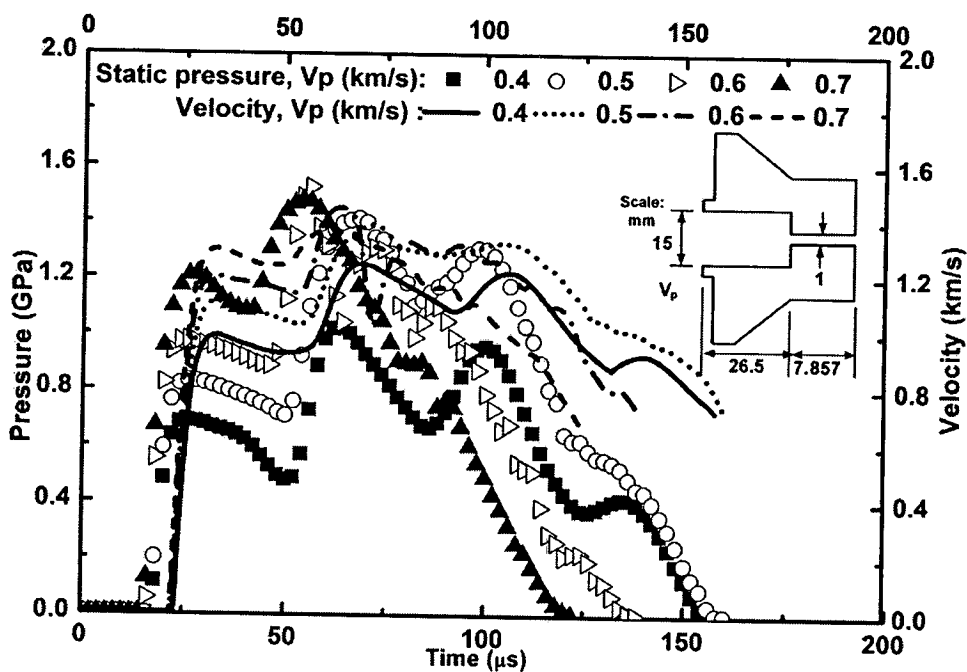


รูปที่ 3.20 ความดันฉีดและความเร็วกับความหนาแน่นของลูกปืนที่เปลี่ยนแปลง

5) ความเร็วของลูกปืน

หัวข้อนี้จะได้อภิปรายอิทธิพลของ ความเร็วลูกปืน ที่มีต่อการกำเนิดลำพุ่ง เนื่องจาก เกี่ยวข้องกับขนาด โมเมนตัมของลูกปืน โดยตรง ทำให้นักวิจัยพยายามที่จะศึกษาผลกระทบของ ความเร็วของลูกปืน ด้วยการทดลองและหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่มี การอธิบายผลได้อย่างชัดเจนว่าความเร็วลูกปืนมีผลกับคุณลักษณะและการกำเนิดลำพุ่งอย่างไร เนื่องจาก ควบคุมปัจจัยการทดลองได้ยากและเป็นกรณีการไหลที่ยุ่งยากซับซ้อน ที่จะอธิบายด้วย สมการคณิตศาสตร์อย่างง่าย แต่อย่างไรก็ตาม ผลจาก CFD ของการศึกษานี้ เราสามารถนำมาช่วย

ศึกษาและอธิบายอิทธิพลของความเร็วลูกปืนได้อย่างชัดเจน กว่าการศึกษาที่ผ่านมาได้ ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วลูกปืน จาก 300 ถึง 700 m/s ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.21 พบว่า ความเร็วและความดันฉีดสูงขึ้น เมื่อความเร็วลูกปืนสูงขึ้น พบลำพุงสี่ลูกและเวลาล่าช้าของการเกิดลำพุงประมาณ 10 μ s ทุกกรณี นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเร็วลูกปืนสูงกว่า 600 m/s ลูกปืนจะกระทบกับบ่าหัวฉีด ซึ่งทำให้เวลาของกระบวนการสร้างลำพุงสั้นลง และเช่นเดียวกับความดันและความเร็วที่ลดลงหลังลำพุงลูกที่สอง ทำให้กราฟของกรณีลูกปืนประเภทแตกต่างจากกรณีไม่กระทบของลูกปืน เนื่องจากโมเมนต์ของลูกปืนไม่ได้ถ่ายให้กับของเหลวในหัวฉีดเท่านั้น แต่บางส่วนถูกถ่ายเทให้กับเนื้อวัสดุของลูกหัวฉีดด้วย



รูปที่ 3.21 ความดันฉีดและความเร็วกับความเร็วยิงของลูกปืน