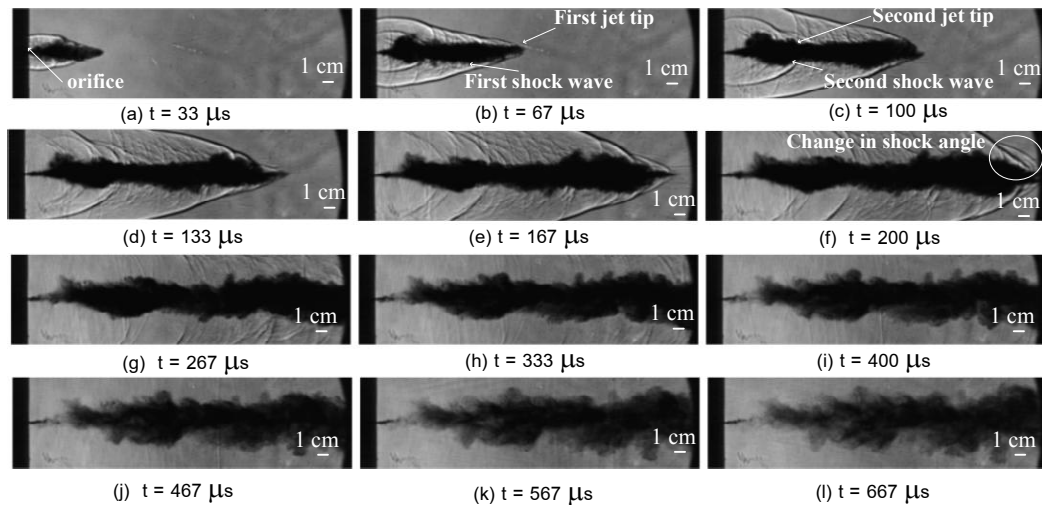


บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 คุณสมบัติของลำพุง Non-Newtonian fluid ความเร็วสูงในอากาศ

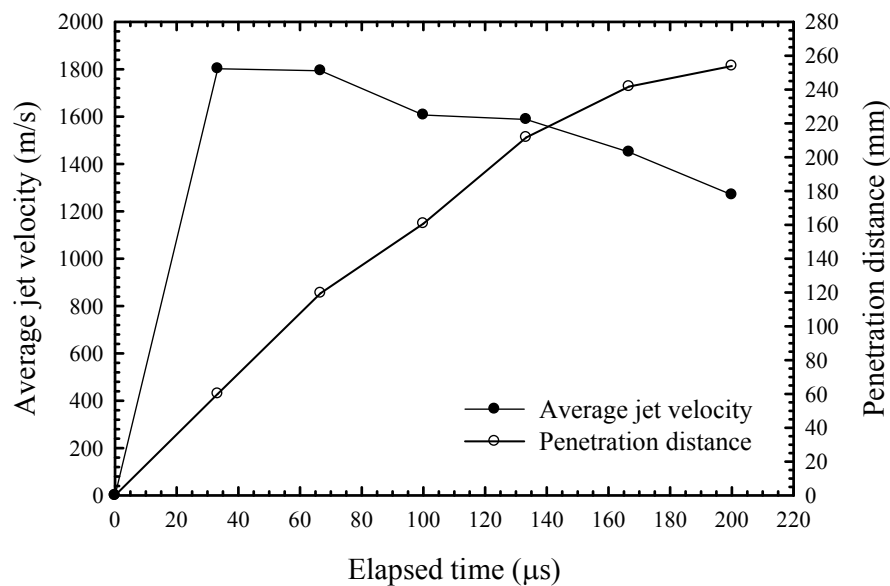


รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพุงนมในอากาศ

(milk jet in air, $V_{j, \max} = 1,802.18 \text{ m/s}$, $\text{Ma} = 5.3$)

รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพุงนม (milk jet) ซึ่งเป็นของไหลชนิด Pseudoplastic ในอากาศ (Milk jet in air) เนื่องจากจำนวนภาพที่ถ่ายได้จากกล้องวิดีโอความเร็วสูงมีจำนวนมาก ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะแสดงภาพเพียง 12 ภาพในการอธิบายคุณลักษณะของลำพุง จากภาพจะสังเกตเห็น ลำพุงที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีด (nozzle) และ shock wave ซึ่งเกิดจากลำพุงรวมไปถึง much wave รอบๆ ลำพุงอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.1(a-g) รูปร่างของลำพุงจะแคบและยาวซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่มากกว่า 250 mm ก่อนที่จะสูญเสียโมเมนตัมและกระจายตัวเป็นฝอยละอองภายในห้องทดสอบดังรูปที่ 4.6(h-l) โดยการเคลื่อนที่ของลำพุงนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเหนือเสียงดังจะสังเกตเห็น shock wave ที่เกิดขึ้น ซึ่งความเร็วเฉลี่ยของลำพุงน้ำตลอดการเคลื่อนที่ผ่านห้องทดสอบระยะการเคลื่อนที่ 250 mm มีค่าเท่ากับ $1,269.33 \text{ m/s}$ คิดเป็น Mach number (Ma) เท่ากับ 3.73 ในขณะที่ความเร็วของลำพุงที่ประมาณได้จากมุมของ shock wave มีค่า $1,174.45 \text{ m/s}$ คิดเป็น Ma เท่ากับ 3.45 ซึ่งพบว่าความเร็วจากการวัดได้ในภาพถ่าย shadowgraph และการวัดจากมุมของ shock wave มีค่าต่างกัน เนื่องมาจากการประเมินจากมุมของ shock wave

จะพิจารณาการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ไม่มีผลของการแตกตัวและการแพร่กระจายของวัตถุ รวมไปถึงจะไม่คำนึงถึงการแตกเป็นฝอยละอองของวัตถุ ซึ่งจะให้ผลที่ถูกต้องกับวัตถุที่แข็งเกร็ง ในขณะที่การเคลื่อนที่ของลำพุงจะมีการแตกตัว (break up) การแตกเป็นฝอยละออง (atomization) และการระเหยกลายเป็นไอ (vaporization) จึงทำให้การวัดความเร็วกับผลจากวิเคราะห์โดย shock wave ให้ผลที่แตกต่างกัน โดยที่ความเร็วสูงสุดของลำพุงมีค่าเท่ากับ 1,802.18 m/s คิดเป็น Mach number (Ma) เท่ากับ 5.3 ที่ $t = 33 \mu\text{s}$ ซึ่งเป็นช่วงความเร็วของ hypersonic



รูปที่ 4.2 ความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุงนมในอากาศ
(average milk jet velocity and jet penetration distance in air)

รูปที่ 4.2 แสดงความเร็วเฉลี่ยและระยะการเคลื่อนที่ของลำพุงนมในอากาศ (average milk jet speed and jet penetration distance in air) พบว่า ความเร็วจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเวลา 33 μs จากนั้นความเร็วของลำพุงจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจาก aerodynamic drag การแตกตัว (break up) การแตกเป็นฝอยละออง (atomization) และการระเหยกลายเป็นไอของลำพุง (vaporization) โดยที่ความเร็วเฉลี่ยของลำพุงน้ำสูงสุดเท่ากับ 1,802.18 m/s ที่เวลาเท่ากับ 33 μs จึงส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุงน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดังรูป

4.2 คุณสมบัติของลำพุง Non-Newtonian fluid ความเร็วสูงในน้ำ

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงคุณสมบัติของลำพุงที่มีความเร็วสูงซึ่งเป็น Non-Newtonian fluid ชนิด Pseudoplastic เมื่อฉีดในน้ำจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph เนื่องจากจำนวนภาพที่ถ่ายได้จากกล้องวิดีโอความเร็วสูงมีจำนวนมาก ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะแสดงภาพเพียง 20 ภาพในการอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น

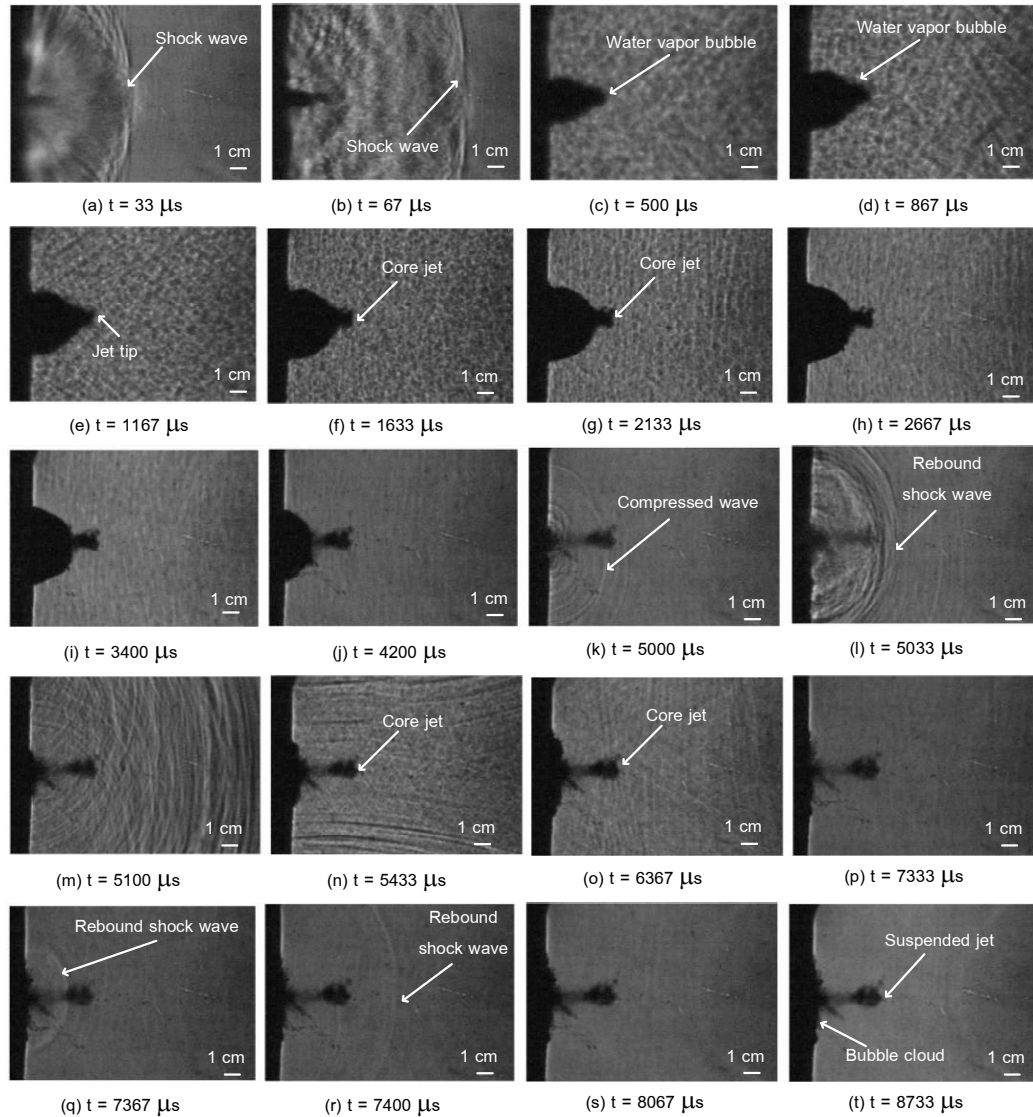
รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพุงนมในน้ำ (milk jet in water) ทันทีที่กระสุนปืนกระแทกน้ำที่บรรจุภายในหัวฉีด ลำพุงจะพุ่งออกมาด้วยความเร็วสูง (ความเร็วประมาณ 1,802.18 m/s ที่เวลา 33 μ s ในอากาศ) จึงทำให้เกิด shock wave ภายในน้ำดังรูปที่ 4.3(a) แต่เนื่องจากลำพุงถูกฉีดภายในน้ำจึงทำให้ความเร็วของลำพุงลดต่ำลงอย่างรวดเร็วเนื่องจาก hydrodynamic drag นั้นมีค่าสูง (จาก $\text{Drag} = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A$ ซึ่ง ρ ของน้ำมีค่าเป็น 1,000 เท่าของอากาศ) โดยความเร็วสูงสุดของลำพุงในน้ำมีค่าประมาณ 288.93 m/s ที่เวลา 67 μ s โดยห่างจากความเร็วของ shock wave ในน้ำ ซึ่งมีความเร็วเท่ากับ 1,459.70 m/s คิดเป็น Mach number ประมาณ 0.97 (ความเร็วเสียงในน้ำมีค่าเท่ากับ 1,500 m/s) ดังแสดงในรูปที่ 4.3(b) จึงทำให้ลำพุงและ shock wave แยกตัวออกจากกันเนื่องจากความเร็วที่ต่างกัน

จากนั้นจะเกิด water vapor bubble เนื่องจากการแตกตัวเป็นละออง (atomization) การกลายเป็นไอ (vaporization) ของลำพุง และเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว (expansion) ดังรูปที่ 4.3(b-d) ซึ่งมีลักษณะเป็นวงรีสีดำเข้มดังรูปที่ 4.3(d) ถึงแม้ว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ water vapor bubble (bubble diameter) ในแนวตั้งของภาพจะขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ยังช้ากว่าระยะการเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration) ในแนวนอนของภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของลำพุง (jet penetration) เร็วกว่าการขยายตัวของ bubble ในแนวตั้ง

จากรูปที่ 4.3(e) พบว่า ระยะการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเท่ากับ 44.76 mm ที่เวลา 1,167 μ s แต่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ยังไม่ขยายตัวสูงสุด ยังคงขยายตัวอย่างต่อเนื่องรอบๆ ลำพุงดังรูปที่ 4.3(f, g) หลังจากระยะการเคลื่อนที่ของ bubble มาถึงจุดสูงสุด bubble จะเริ่มยุบตัว ในขณะที่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (ในแนวตั้ง) ยังขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

จากรูปที่ 4.3(h) พบว่า เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 53.83 mm ที่เวลา 2,667 μ s คิดเป็นความเร็วในการขยายตัวเท่ากับ 20.19 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวจึงทำให้สังเกตเห็นแกนของลำพุง (core jet) ซึ่งเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างช้าๆ จนเกือบจะหยุดนิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.3(i) ซึ่งการยุบตัวของลำพุงนั้นเกิดจากความดันของ bubble ต่ำกว่าความดันของน้ำภายในห้องทดสอบ โดยก่อนที่ bubble จะยุบตัวลดลงเกือบจะถึงค่าต่ำสุดดังรูปที่ 4.3(k) จะเกิด compressed wave ขึ้นเมื่อ bubble ยุบตัวลดลงต่ำสุดเท่ากับ 15.01 mm ที่เวลา 5,033 μ s คิดเป็นความเร็วในการยุบตัวเท่ากับ 16.40 m/s ซึ่งทำให้เกิด rebound shock wave ดังรูปที่ 4.3(l)

เนื่องจากการยุบตัวของ bubble จะทำให้เกิดความดันสูงขึ้นในทันทีทันใดภายใน bubble ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยปรากฏการณ์ของ cavitation ซึ่งจากการประมาณจากภาพถ่ายพบว่า rebound shock wave มีความเร็ว 1,459.39 m/s คิดเป็น Mach number ประมาณ 0.97



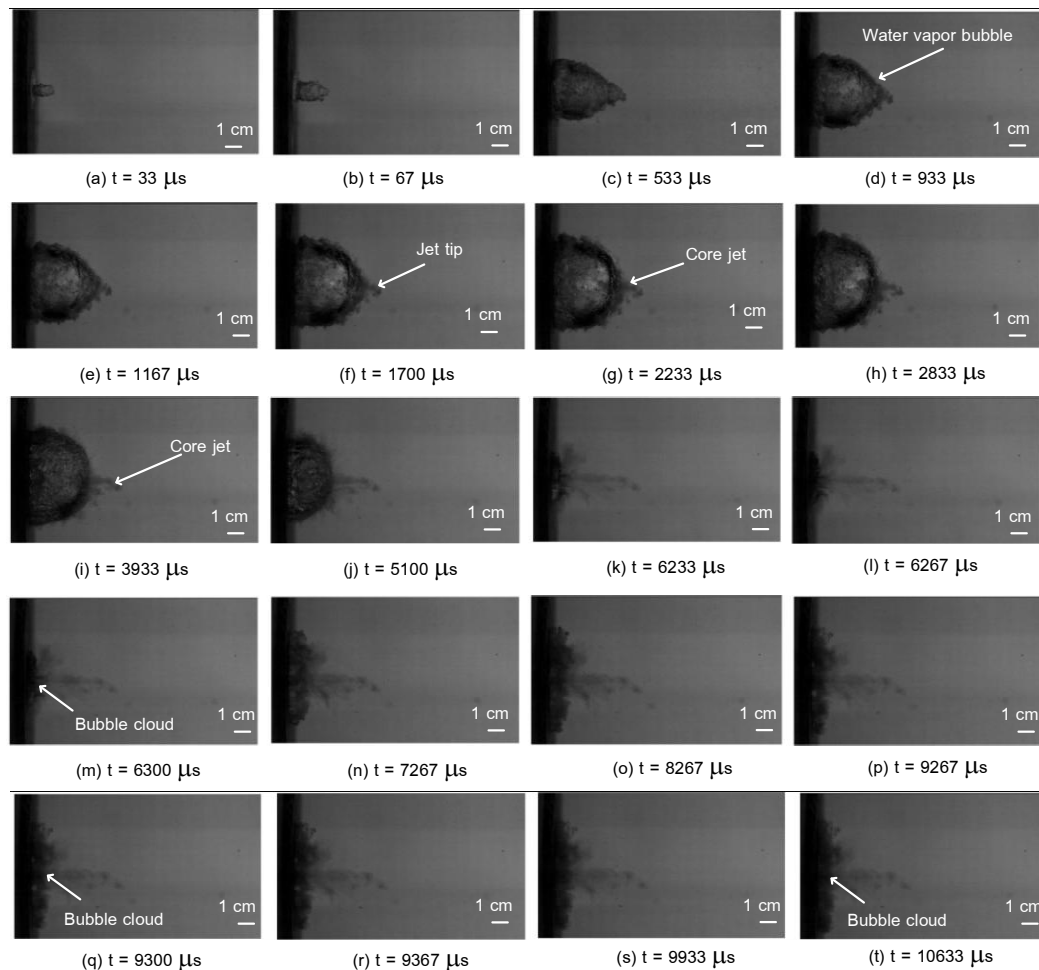
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ของลำพุงนมในน้ำ

(milk jet in water, $V_{j, \max} = 288.93 \text{ m/s}$)

จากรูปที่ 4.3(m) เนื่องจากความดันภายใน bubble มีค่าสูงมาก ไม่เพียงแต่ทำให้เกิด rebound shock wave ยังทำให้เกิด water vapor bubble ขึ้นอีกครั้งรูปที่ 4.3(m-p) ถึงแม้ว่ากลไกการขยายตัวและการยุบตัวของ bubble จะสังเกตเห็นไม่ชัดเจน แต่ก็เชื่อว่าการเกิดดังกล่าวก่อให้เกิดขึ้น

อีกครั้งจริง จากการสังเกตเห็น compressed wave, rebound shock wave และ shock wave ที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.3(p-r) ดังนั้นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในครั้งนี้อาจคล้ายกับพฤติกรรมการขยายตัวและยุบตัวของ water vapor bubble ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ (ดังแสดงในรูปที่ 4.3(a-j) โดยที่การเคลื่อนที่ของ rebound shock wave ที่เกิดขึ้นในครั้งนี้อาจมีความเร็วเท่ากับ 1,416.36 m/s คิดเป็น Mach number ประมาณ 0.94

จากรูปที่ 4.3(r) จะพบ rebound shock wave ที่เกิดจากกลไกการขยายตัวและยุบตัวของ bubble ในครั้งที่สอง จากนั้นความดันภายใน bubble จะลดต่ำลงจนไม่สามารถทำให้เกิด bubble ขึ้นอีกครั้งได้ จึงทำให้ไม่พบกลไกการขยายตัวและยุบตัวที่ทำให้เกิด rebound shock wave ขึ้นอีกครั้งได้ จากนั้น bubble จะลอยตัวขึ้นเนื่องจากแรงลอยตัว ในขณะที่ core jet จะแขวนตัวในน้ำภายในห้องทดสอบ ดังรูปที่ 4.3(s-t) เนื่องจากการสูญเสียแรงพลศาสตร์ (Dynamic force)



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพ่นนมในน้ำ

รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพ่นนมในน้ำ (milk jet in water) โดยเลือกภาพจำนวน 20 ภาพที่สอดคล้องกับรูปที่ 4.3 ซึ่งกลไกของการเกิดลำพ่นและ bubble นั้นจะช่วยอธิบายพฤติกรรมที่เห็นได้ไม่ชัดเจนในการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph ในรูปที่ 4.3

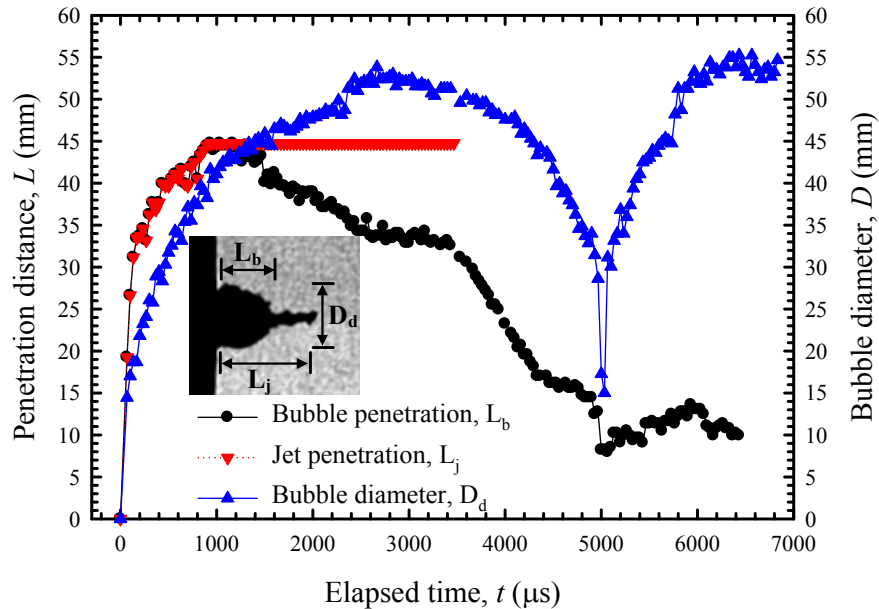
เมื่อกระสุนปืนกระทบแท่นกั้นที่บรรจุภายในหัวฉีด ลำพ่นจะพุ่งออกมาด้วยความเร็วสูงและทำให้เกิด water vapor bubble โดยที่ความเร็วสูงสุดของลำพ่นมีค่าประมาณ 364.69 m/s ที่เวลา 67 μ s ดังรูปที่ 4.4(a) จากรูปที่ 4.4(b-d) จะสังเกตเห็นการเกิดและการขยายตัวของ bubble ซึ่ง bubble จะขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังจากนั้น bubble จะเคลื่อนที่ถึงระยะการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 46.32 mm ที่เวลา 1,167 μ s ดังรูปที่ 4.4(e) จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวกลับและจะเริ่มสังเกตเห็นปลายของลำพ่น สังเกตได้จากรูปที่ 4.4(f, g)

จากรูปที่ 4.4(h) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวตั้ง (D_y) ขยายตัวสูงสุดเท่ากับ 65 mm ที่เวลา 2,833 μ s คิดเป็นความเร็วในการขยายตัวเท่ากับ 22.94 m/s จากนั้น bubble จะเริ่มยุบตัวและจะสังเกตเห็นแกนของลำพ่นดังรูปที่ 4.4(i-k) จากรูปที่ 4.4(i-k) จะพบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะยุบตัวลงต่ำสุดเท่ากับ 30.70 mm ที่เวลา 6,233 μ s คิดเป็นความเร็วในการยุบตัวเท่ากับ 9.99 m/s และจะเห็นรูปร่างของ bubble เป็นเส้นหยัก

จากภาพถ่ายโดยเทคนิค shadowgraph ที่ผ่านมาในรูปที่ 4.4(m-r) นั้นกลไกการขยายตัวและยุบตัวนั้น ไม่สามารถอธิบายได้ เพราะรูปที่ได้จากเทคนิคการถ่ายภาพ shadowgraph สังเกตเห็นไม่ชัดเจน ซึ่งกลไกดังกล่าวสามารถอธิบายโดยรูปที่ 4.4(m-r) หลังจาก bubble ยุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุด bubble จะขยายตัวอีกครั้ง เนื่องจากการสะสมของความดันที่เพิ่มสูงขึ้นจากการยุบตัวของ bubble ซึ่ง bubble ได้ขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็วในแนวตั้ง แต่จะไม่เห็นการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าในแนวนอนอีก จากนั้น bubble จะยุบตัวลงจนถึงค่าต่ำสุดอีกครั้งดังรูปที่ 4.4(q-s) หลังจากนั้น bubble จะลอยตัวเนื่องจากแรงลอยตัวและแขนลอยในน้ำในห้องทดสอบ ดังรูปที่ 4.4(t) ซึ่งจากการสังเกตในรูปที่ 4.4 นี้จะช่วยสนับสนุนผลที่ได้จากเทคนิคการถ่ายภาพ shadowgraph จากรูปที่ได้นั้นจะช่วยในการอธิบายกลไกการเกิด bubble การขยายตัว การยุบตัว และการหายไปของ bubble ได้อย่างชัดเจนและเข้าใจง่าย แต่เนื่องจากการไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพ shadowgraph จึงทำให้ไม่เห็น shock wave และ rebound shock wave ในน้ำ

รูปที่ 4.5 แสดงระยะการเคลื่อนที่ของลำพ่นและ bubble และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ของลำพ่นนมในน้ำ จากภาพพบว่า ระยะการเคลื่อนที่ของลำพ่นมีการเคลื่อนที่ไกลสุดเกิดขึ้นที่เวลา 1,167 μ s ซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่เท่ากับ 44.76 mm หลังจากนั้นลำพ่นจะหยุดนิ่งไม่มีการเคลื่อนที่อีกและในขณะที่ bubble ก็มีระยะการเคลื่อนที่ไกลสุดเกิดขึ้นที่เวลา 1,167 μ s เช่นกัน จากนั้น bubble จะค่อยๆ ยุบตัวลงต่ำลงเนื่องจาก hydrodynamic drag ซึ่ง bubble ของน้ำจะยุบตัวลงในช่วงเวลา 1,167 - 5,067 μ s ในขณะที่เส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวสูงสุดที่เวลา 2,667

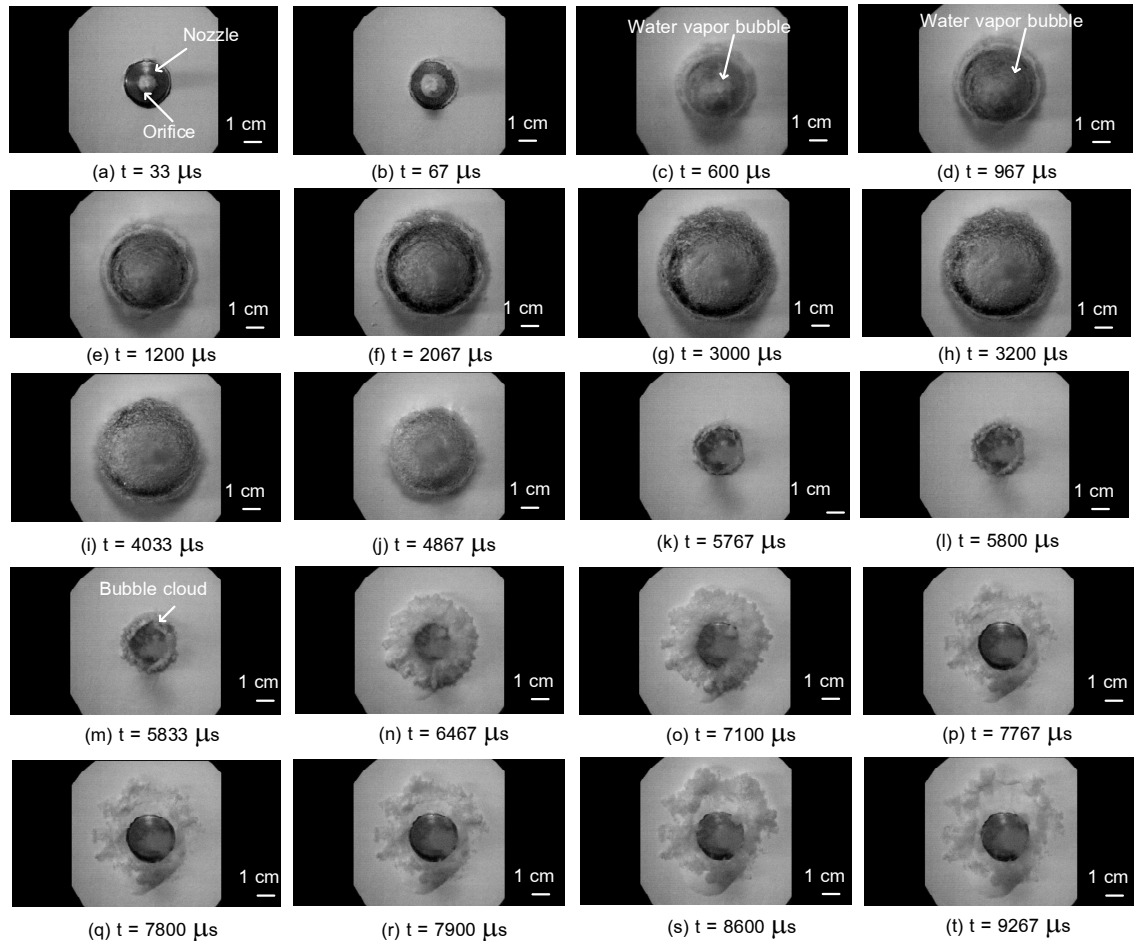
μs ซึ่งมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 53.83 mm จากนั้น bubble จะยุบตัวลงและจะเริ่มขยายตัวอีกครั้งที่เวลา 5,033 μs



รูปที่ 4.5 ระยะการเคลื่อนที่ของลำฟุ้งและ bubble และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ของลำฟุ้งนมในน้ำ (jet and bubble penetration distance and bubble diameter of milk jet in water)

รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำฟุ้งนมในน้ำ (Milk jet in water) เนื่องจากจำนวนภาพที่ถ่ายได้จากกล้องวิดีโอความเร็วสูงมีจำนวนมาก ดังนั้น จะแสดงภาพเพียง 20 ภาพในการอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 4.6(a-f) พบว่า bubble นั้นเกือบจะกลมอย่างสมมาตรและขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ขยายตัวสูงสุดในแนวนอน (D_x) เท่ากับ 60.39 mm ที่เวลา 3,000 μs และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 61.93 mm ที่เวลา 3,200 μs ดังรูปที่ 4.11(g) จากนั้นจะเริ่มยุบตัวลงอย่างรวดเร็วจนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดลงต่ำสุดในแนวนอน (D_x) มีขนาด 27.89 mm และในแนวตั้ง (D_y) มีขนาด 28.15 mm ที่เวลา 5,767 μs ดังรูปที่ 4.6(h-k) เนื่องจากไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ shadowgraph การเกิด shock wave ในน้ำและ rebound shock wave เมื่อ bubble ลดขนาดลงต่ำสุดจึงไม่สามารถสังเกตเห็น จากรูปที่ 4.6(l-n) หลังจากเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดขนาดลงต่ำสุด bubble จะแตกตัวเป็นกลุ่ม bubble (bubble cloud) และจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเป็นลักษณะรูปวงแหวนรอบๆ หัวฉีด ดังรูปที่ 4.6(m) โดย bubble มีการยุบตัวอย่างช้าๆ ดังรูปที่ 4.6(o-

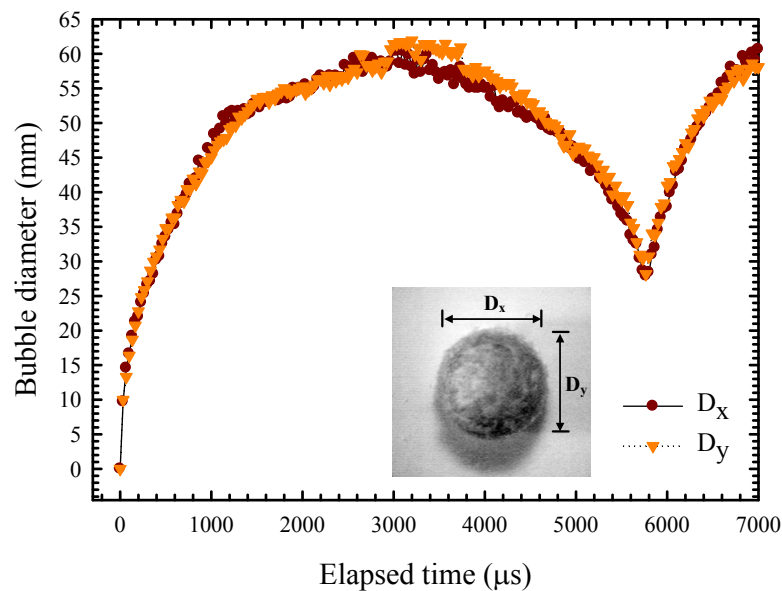
s) ก่อนที่จะหายไปดังรูปที่ 4.6(t) จากการสังเกตในมุมมองนี้ การเกิด bubble การขยายตัว การยุบ และการหายไปของ bubble จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนและเข้าใจง่ายขึ้น



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพ่นมนในน้ำ

รูปที่ 4.7 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของลำพ่นในแนวนอน (D_x) และแนวตั้ง (D_y) ของลำพ่นมนในน้ำ (bubble diameter D_x and D_y of water jet injected in water) เมื่อพิจารณาเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ bubble ในแนวนอน (D_x) จะพบว่ามีความยาวที่มากกว่า bubble ในแนวตั้ง (D_y) จากนั้นจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปโดยจะมีการขยายตัวใหญ่สุดที่เวลา 2,900 μs ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ bubble ในแนวนอน (D_x) เท่ากับ 60.39 mm และในแนวตั้ง (D_y) เท่ากับ 61.93 mm ที่เวลาเท่ากับ 3,200 μs จากนั้น bubble จะยุบตัวลงจนถึงเวลาประมาณ 5,767 μs ซึ่งพบว่า bubble ในแนวนอน (D_x) จะมีขนาดเล็กกว่า bubble ในแนวตั้ง (D_y) เนื่องจากผลของความดันน้ำที่กระทำกับขอบของ bubble ที่ระดับความลึกของน้ำที่แตกต่างกันในแนวตั้ง (D_y) จึงทำให้

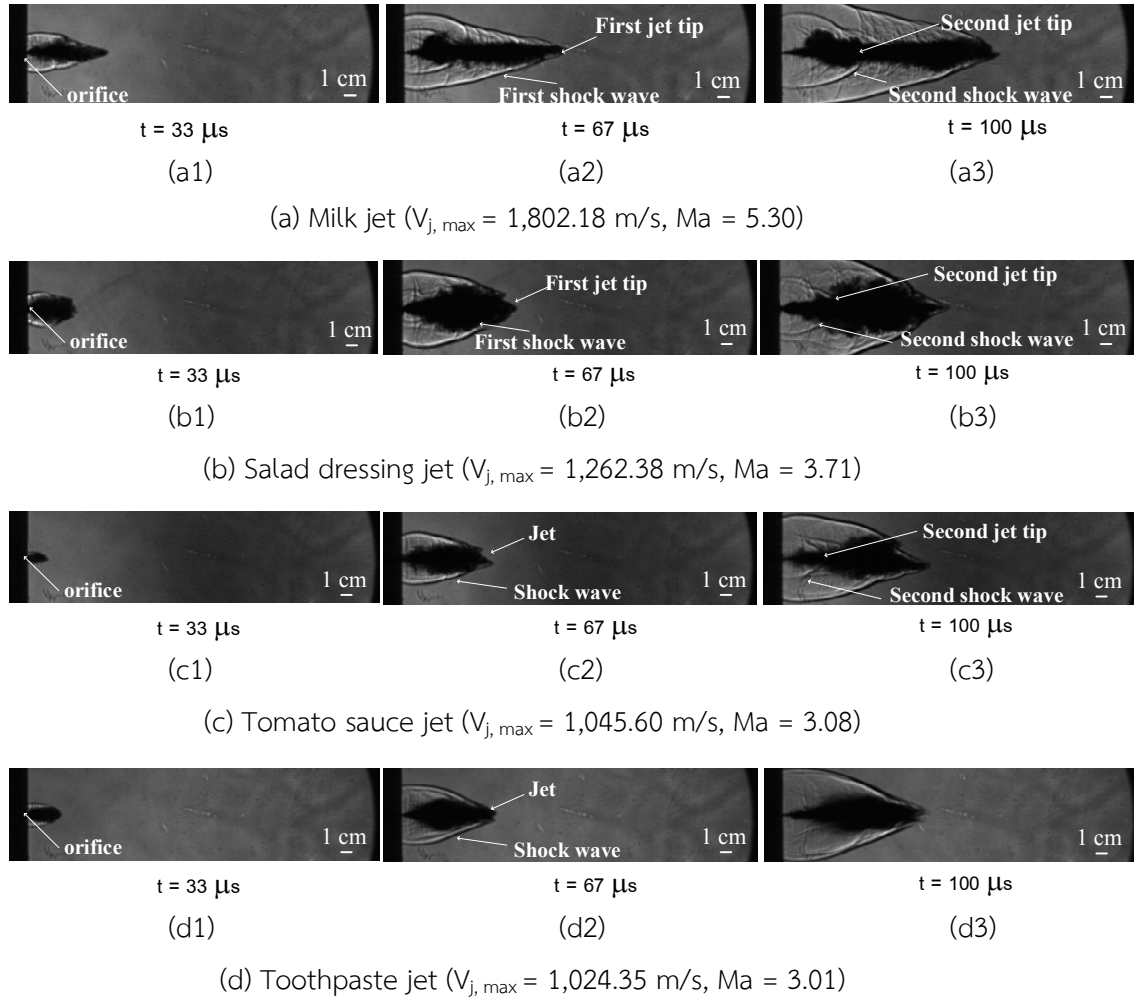
bubble ไม่มีรูปร่างเป็นวงกลมอย่างสมมาตร จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะยุบตัวลดลง ซึ่งการยุบตัวใช้เวลาในช่วง $2,900 - 5,767 \mu\text{s}$ จนถึงขนาดต่ำสุดที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 27.89 mm ในแนวนอน (D_x) และ 28.15 mm ในแนวตั้ง (D_y) จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะเริ่มขยายตัวอีกครั้ง โดยความเร็วของการขยายตัวของ bubble ในน้ำในช่วงเวลา $0 - 2,900 \mu\text{s}$ คิดเป็น 20.13 m/s ในแนวนอน (D_x) และในช่วงเวลา $0 - 3,100 \mu\text{s}$ คิดเป็น 19.36 m/s ในแนวตั้ง (D_y) และความเร็วของการยุบตัวที่ช่วงเวลา $2,900 - 5,767 \mu\text{s}$ คิดเป็น 11.34 m/s ในแนวนอน (D_x) และ 12.67 m/s ในแนวตั้ง (D_y)



รูปที่ 4.7 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำพุงในแนวนอน (D_x) และแนวตั้ง (D_y) ของลำพุงนมในน้ำ (bubble diameter D_x and D_y of milk jet injected in water)

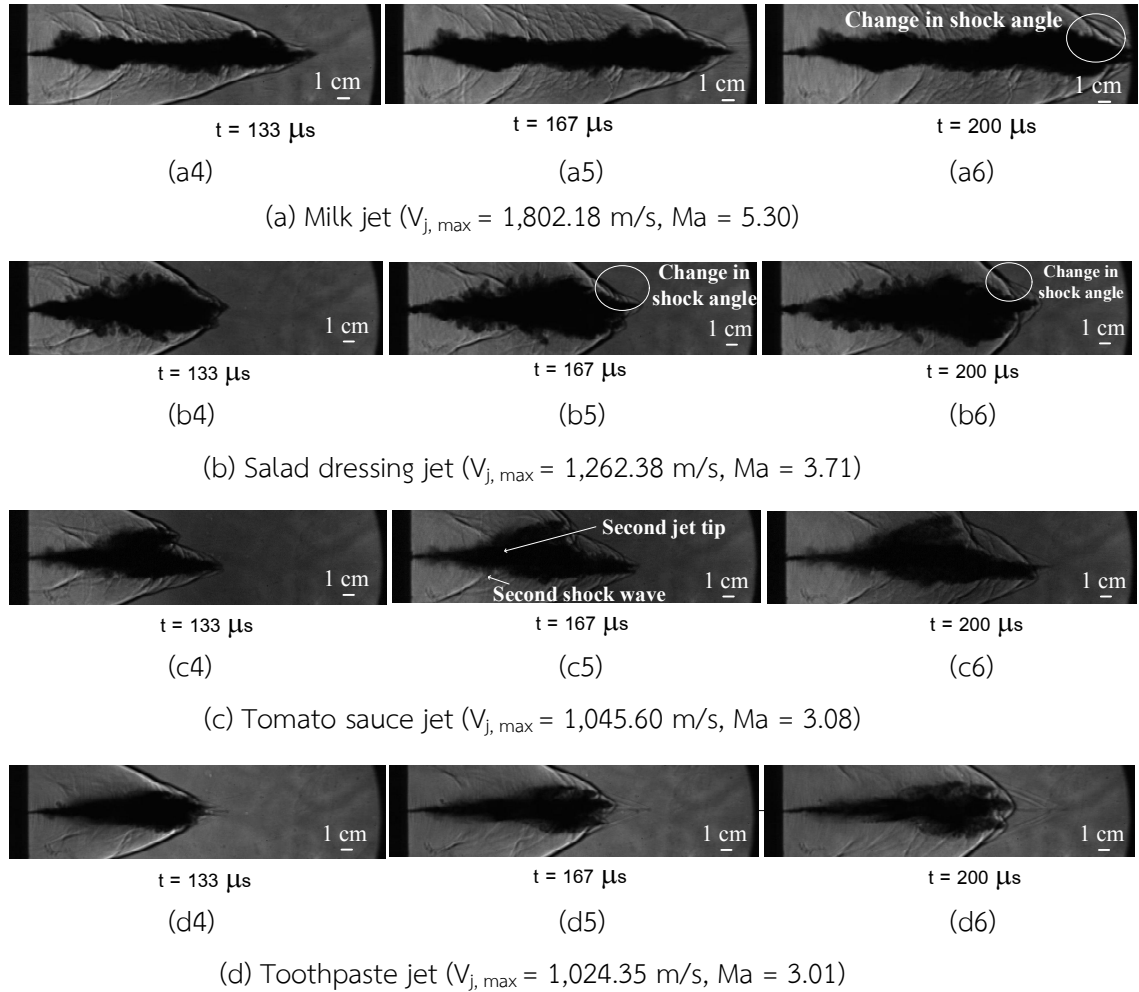
4.3 อิทธิพลของชนิดลำพุงของ Non-Newtonian fluid ความเร็วสูงเมื่อฉีดในอากาศ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอิทธิพลของชนิดของลำพุงต่อคุณลักษณะของลำพุงความเร็วสูงเมื่อฉีดในอากาศโดยของเหลวในการศึกษานี้ คือ นม (milk) น้ำสลัด (salad dressing) ซอสมะเขือเทศ (Tomato sauce) และ ยาสีฟัน (Toothpaste) ซึ่งเป็น Non-Newtonian fluid ชนิด Pseudoplastic, Dilatant, Plastic และ Bingham plastic ตามลำดับ โดยในการอธิบายคุณลักษณะของลำพุงที่เกิดขึ้นจะใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph



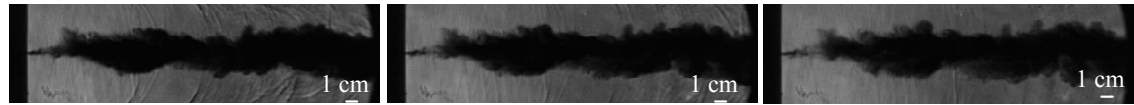
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิด เมื่อฉีดในอากาศ

รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิด เมื่อฉีดในอากาศ เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ 33 - 67 μs พบว่า นม (milk) จะมีลักษณะแคบเรียวแหลม ในขณะที่ลำพุ่งน้ำสลัด (salad dressing) ยาสีฟัน (Toothpaste) และซอสมะเขือเทศ (Tomato sauce) จะมีลักษณะเรียวกว้างหรืออ้วนกว่า เนื่องจากลำพุ่งทุกชนิดนั้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ดังนั้นจึงสังเกตเห็น shock wave และ mach wave ที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ 100 μs จะเริ่มสังเกตเห็น second shock wave เกิดขึ้นกับนม (milk), น้ำสลัด (salad dressing), ซอสมะเขือเทศ (Tomato sauce) ซึ่งบ่งบอกว่าอาจมีลำพุ่งเกิดขึ้นอีกลำพุ่งจากการกระแตกของกระสุนปืนเพียงครั้งเดียว ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะที่ได้ถูกอธิบายไว้แล้วในการศึกษาของ K.Pianthong และคณะ [45, 46] และ A.Matthujak และคณะ [39] ในขณะที่ไม่สามารถสังเกตพบในยาสีฟัน (Toothpaste)



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิด เมื่อฉีดในอากาศ (ต่อ)

เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ $133 - 200 \mu s$ พบว่า นม (milk) ยังคงมีลักษณะเรียวยาวแหลม ในขณะที่ลำพุ่งยาสีฟัน (Toothpaste) น้ำสลัด (salad dressing) และซอสมะเขือเทศ (Tomato sauce) เริ่มมีการชะลอความเร็วและมีขนาดลำพุ่งที่ใหญ่ขึ้น และเมื่อสังเกตที่ shock wave พบว่า มีการเปลี่ยนมุมของ shock wave (change in shock angle) ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่า การเคลื่อนที่ของลำพุ่งลำที่สองมีความเร็วสูงกว่าลำพุ่งลำที่หนึ่งและเกิดการแซงของลำพุ่งลำที่สอง และ ในขณะที่ลำพุ่งน้ำสลัด (salad dressing) เริ่มมีความเร็วช้าลงซึ่งสังเกตจากมุมของ shock wave ที่เริ่มเปลี่ยนจาก oblique shock เป็น bow shock

t = 267 μ s

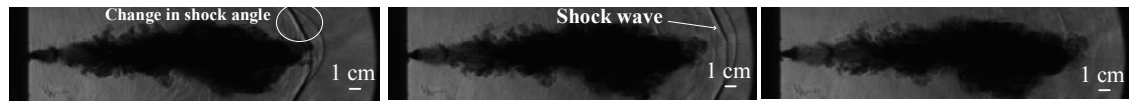
(a7)

t = 333 μ s

(a8)

t = 400 μ s

(a9)

(a) Milk jet ($V_{j, \max} = 1,802.18$ m/s, $Ma = 5.30$)t = 267 μ s

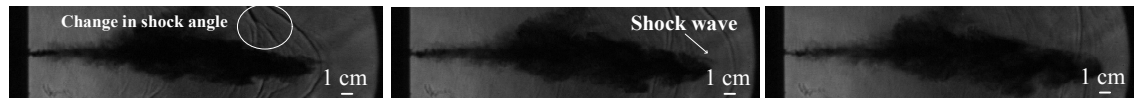
(b7)

t = 333 μ s

(b8)

t = 400 μ s

(b9)

(b) Salad dressing jet ($V_{j, \max} = 1,262.38$ m/s, $Ma = 3.71$)t = 267 μ s

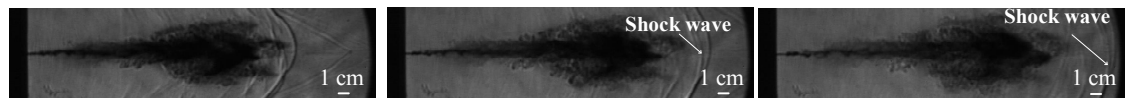
(c7)

t = 333 μ s

(c8)

t = 400 μ s

(c9)

(c) Tomato sauce jet ($V_{j, \max} = 1,045.60$ m/s, $Ma = 3.08$)t = 267 μ s

(d7)

t = 333 μ s

(d8)

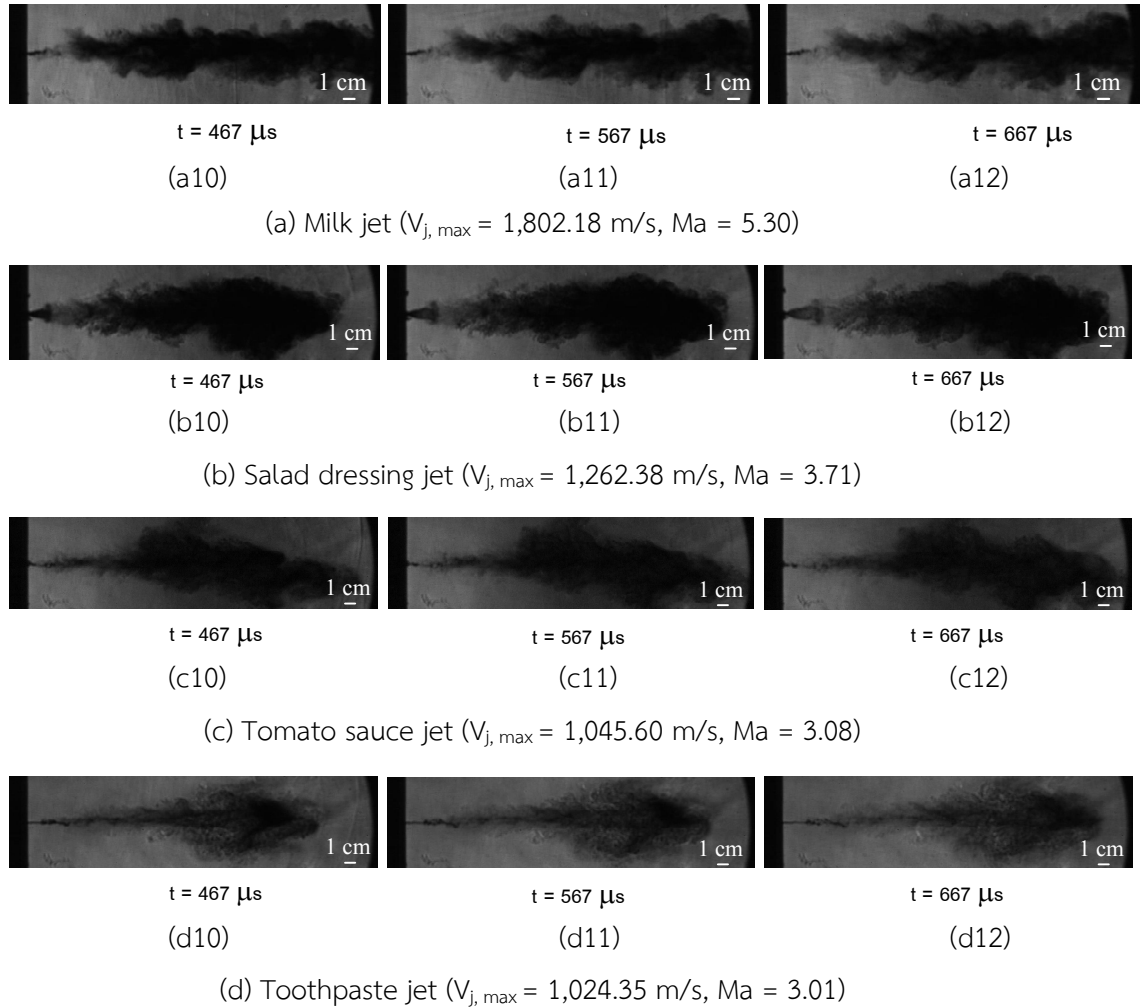
t = 400 μ s

(d9)

(d) Toothpaste jet ($V_{j, \max} = 1,024.35$ m/s, $Ma = 3.01$)

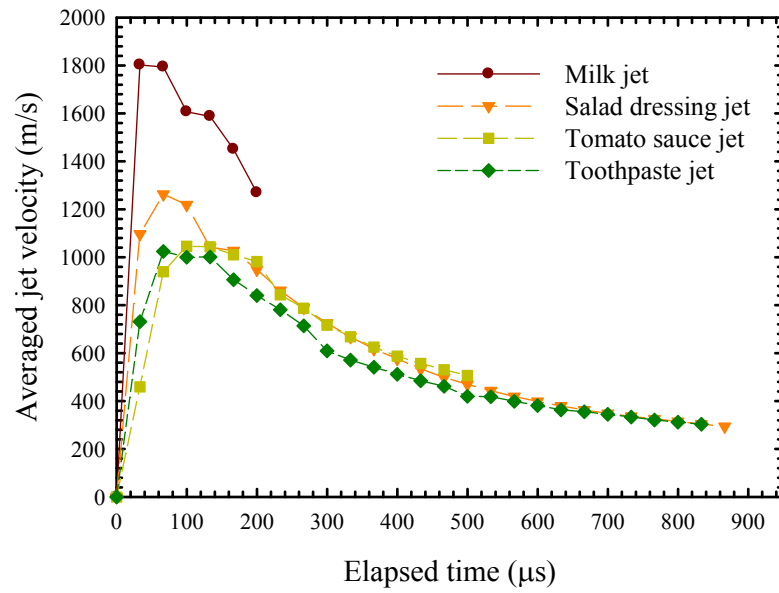
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุงความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิด เมื่อฉีดในอากาศ (ต่อ)

เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ 267 – 400 μ s พบว่า ลำพุงนมยังคงมีลักษณะเรียวแหลมและยังไม่แสดงให้เห็นถึงการแตกตัวเป็นฝอยละออง เมื่อพิจารณาลำพุงน้ำสลัด (Salad dressing) จะพบว่าขนาดของลำพุงมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเร็วช้าลงซึ่งสังเกตจากมุมของ shock wave ที่เริ่มเปลี่ยนจาก oblique shock เป็น bow shock เช่นเดียวกับลำพุงซอสมะเขือเทศ (Tomato sauce) ในขณะที่การแตกตัวเป็นฝอยละอองอย่างรุนแรงเกิดขึ้นกับลำพุงยาสีฟัน (Toothpaste) อย่างเห็นได้ชัด

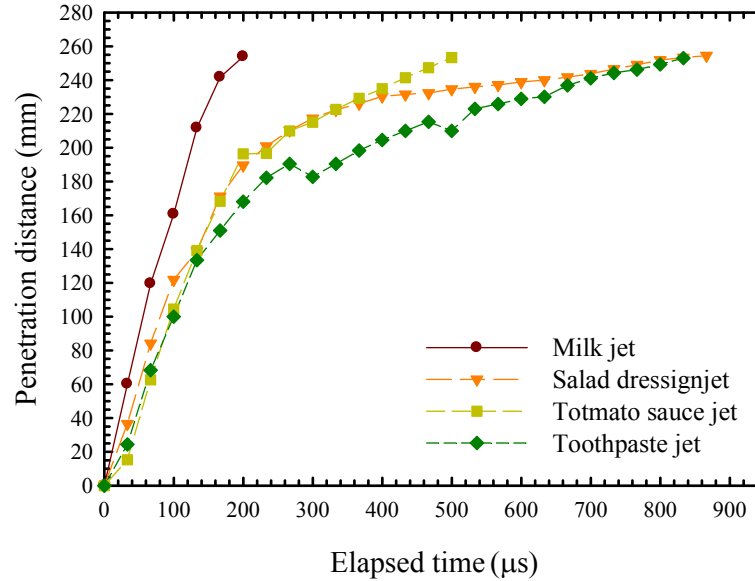


รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิด เมื่อฉีดในอากาศ (ต่อ)

เมื่อพิจารณาที่เวลาเท่ากับ 467 – 667 μs พบว่า ลำพุ่งนม (Milk) ยังคงมีลักษณะเรียวยาวแหลม ในขณะที่การแตกตัวเป็นฝอยละอองเกิดขึ้นกับลำพุ่งที่เหลือทั้ง 3 ชนิดอย่างชัดเจน โดยเฉพาะกับลำพุ่งยาสีฟัน (Toothpaste) จากรูปที่ 4.8 จึงอาจกล่าวได้ว่า ลำพุ่งชนิด Pseudoplastic จะมีลักษณะเรียวยาวแหลมที่สุด ส่วนลำพุ่งชนิด Dilatant จะมีลักษณะบวมกว้างขึ้นอย่างรวดเร็วแต่มีการแตกเป็นฝอยละอองไม่มาก ในขณะที่ลำพุ่งชนิด Plastic และ Bingham plastic มีการแตกตัวเป็นฝอยละอองมากที่สุดอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการไหลของของไหลในแต่ละชนิดดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2



รูปที่ 4.9 ความเร็วเฉลี่ย (average jet velocity) ของลำพ่นทั้ง 4 ชนิด



รูปที่ 4.10 ระยะการเคลื่อนที่ (penetration distance) ของลำพ่นทั้ง 4 ชนิด

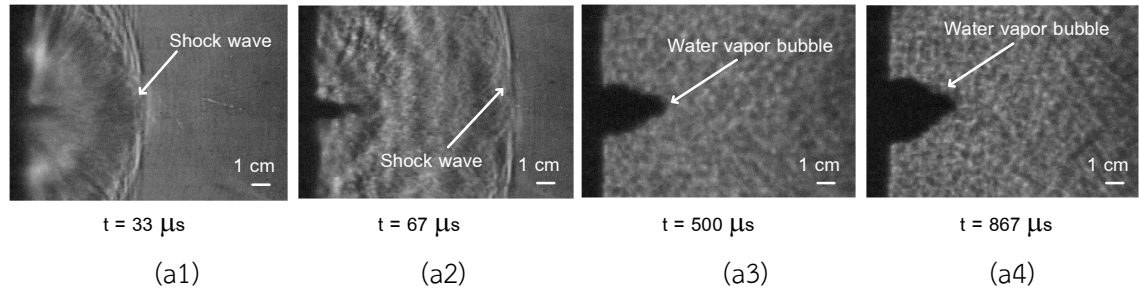
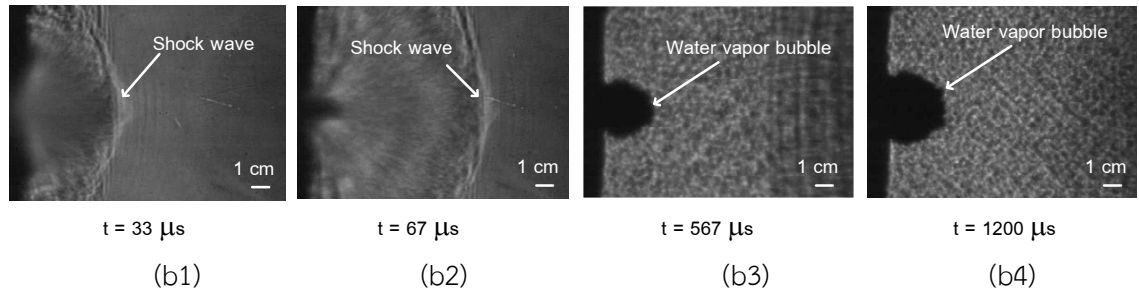
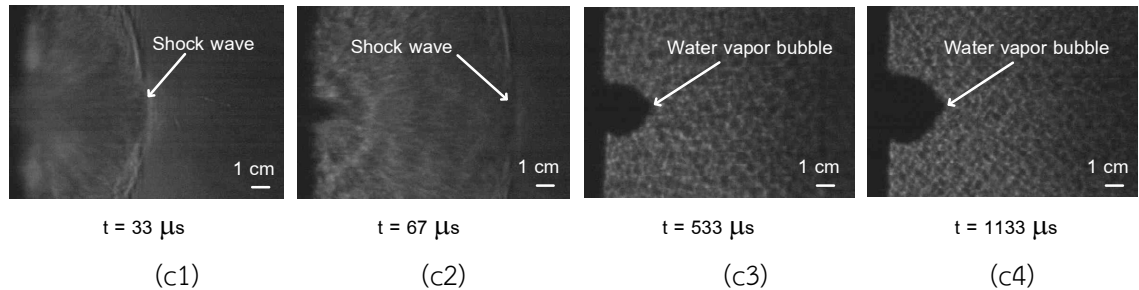
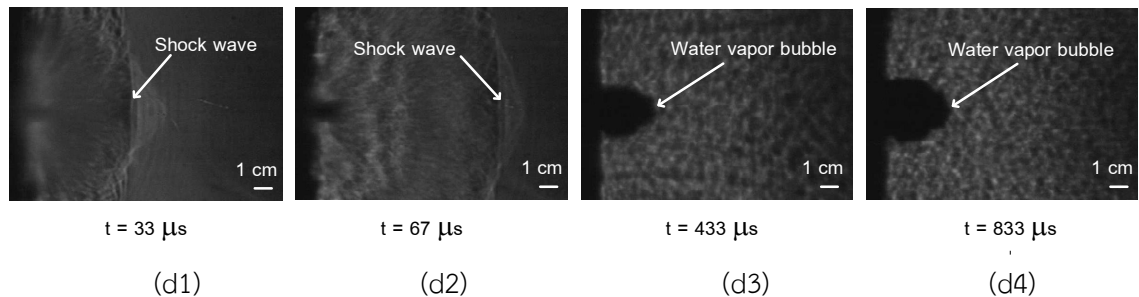
จากรูปที่ 4.9 แสดงความเร็วเฉลี่ยของลำพ่นทั้ง 4 ชนิด จากรูป พบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของลำพ่นนม (milk) น้ำสลัด (salad dressing) ซอสมะเขือเทศ (Tomato sauce) และยาสีฟัน (Toothpaste) มีค่าเท่ากับ 1,802.18 m/s, 1,262.38 m/s, 1,045.60 m/s และ 1,024.35 m/s ตามลำดับ ที่เวลาเท่ากับ 67 μ s จากนั้นความเร็วของลำพ่นจะค่อยๆ ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งความเร็วที่ผลิตได้ของแต่ละลำพ่นมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักยกเว้นลำพ่นนมที่มีค่าสูงกว่าชนิดอื่นอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติเป็น shear thinning ผลของความเร็วของลำพ่นทั้ง 4 ชนิด จึงสอดคล้องกับระยะการเคลื่อนที่ของลำพ่นโดยที่ลำพ่นนม (milk), น้ำสลัด (salad dressing), ซอสมะเขือเทศ (Tomato sauce) และ ยาสีฟัน (Toothpaste) เคลื่อนที่ได้ 119.57 mm, 84.15 mm, 68.28 mm และ 62.62 mm ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10 โดยความเร็วเฉลี่ยสูงสุด Mach no และระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของลำพ่นทั้ง 4 ชนิดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพ่นความเร็วสูงในอากาศ

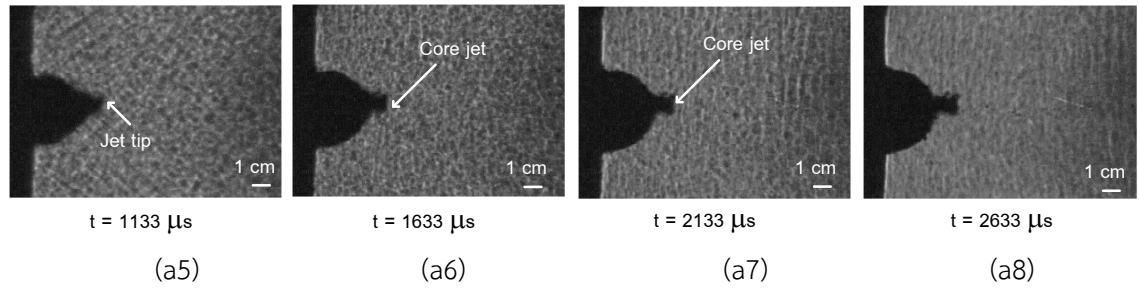
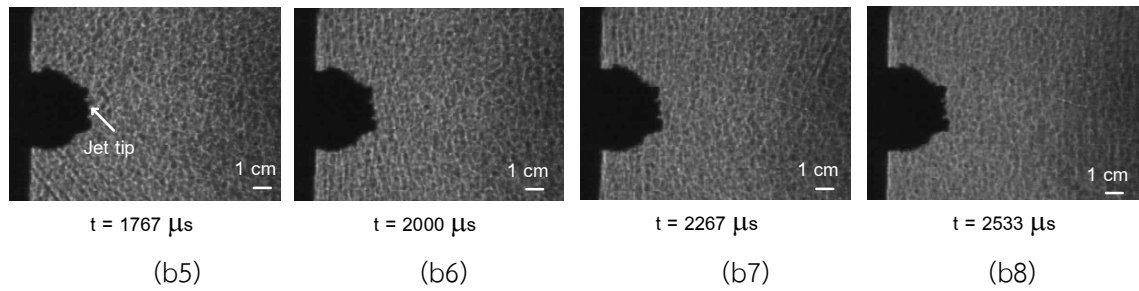
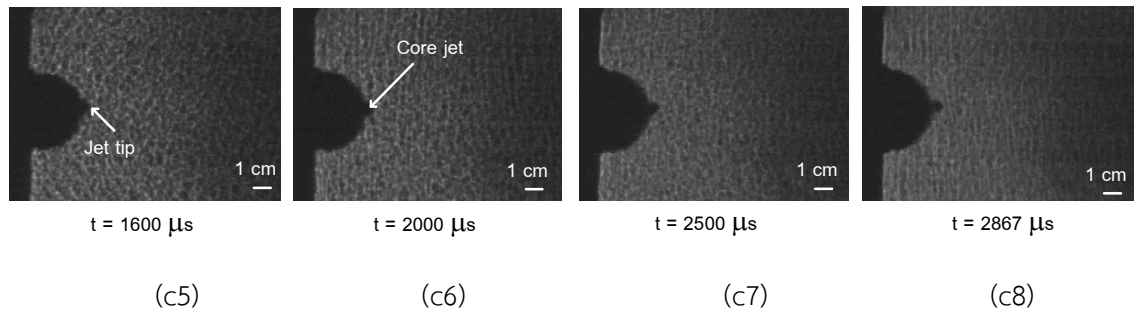
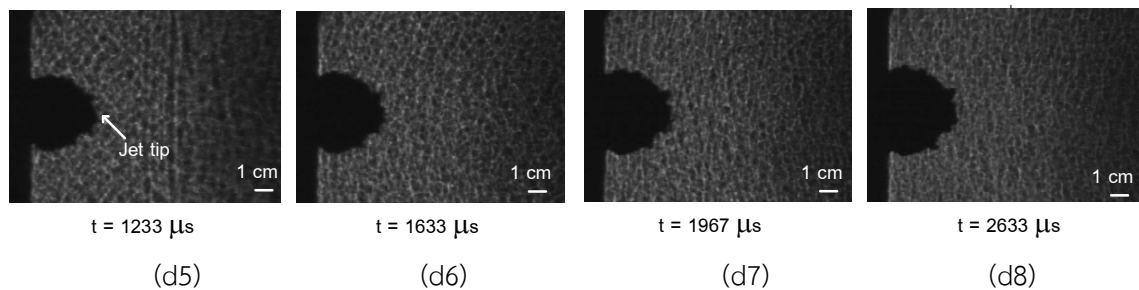
Liquid type	Non-Newtonian type	Maximum average jet velocity (m/s)	Mach no.	Jet Penetration distance at 67 μ s (mm)
Milk	Pseudo plastic	1,802.18	5.30	119.57
Salad dressing	Dilatant	1,262.38	3.71	84.15
Tomato sauce	Plastic	1,045.60	3.08	68.28
Toothpaste	Bingham plastic	1,024.35	3.01	62.62

4.4 อิทธิพลของชนิดลำพ่นของ Non-Newtonian fluid ความเร็วสูงเมื่อฉีดในน้ำ

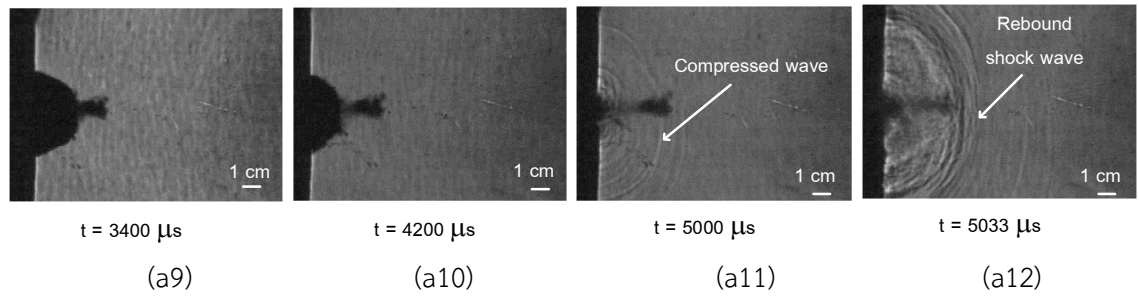
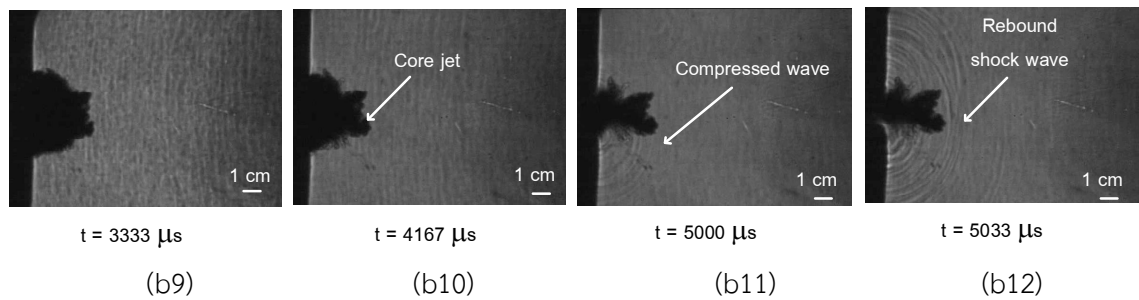
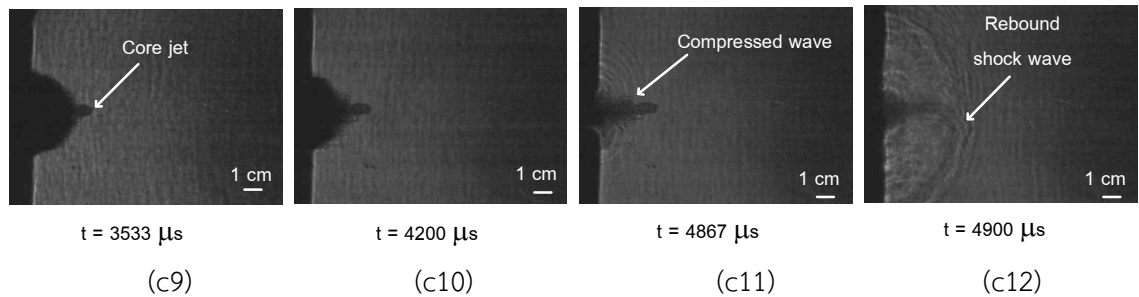
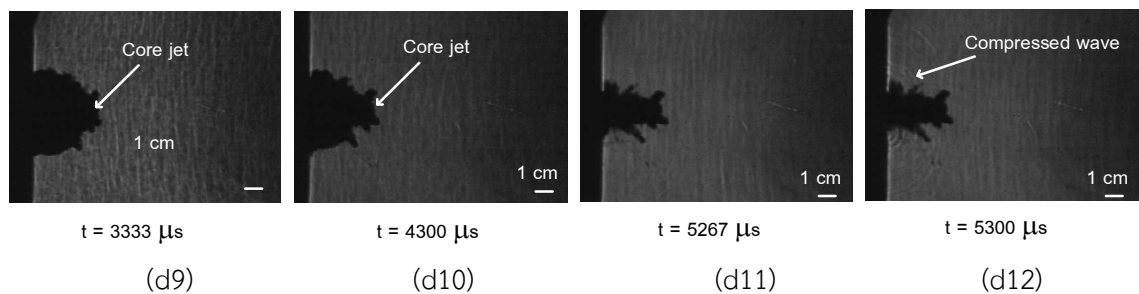
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอิทธิพลของชนิดของลำพ่นต่อคุณลักษณะของลำพ่นความเร็วสูงเมื่อฉีดในน้ำโดยของเหลวที่ใช้เป็นชนิดเดียวกับกรณีฉีดในอากาศ ในการอธิบายคุณลักษณะของลำพ่นที่เกิดขึ้น จะใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph และไม่มีเทคนิค Shadowgraph ร่วมถึงการถ่ายภาพในแนวแกน


 (a) Milk jet ($V_{j, \max} = 228.93 \text{ m/s}$)

 (b) Salad dressing jet ($V_{j, \max} = 199.67 \text{ m/s}$)

 (c) Tomato sauce jet ($V_{j, \max} = 175.62 \text{ m/s}$)

 (d) Toothpaste jet ($V_{j, \max} = 233.72 \text{ m/s}$)

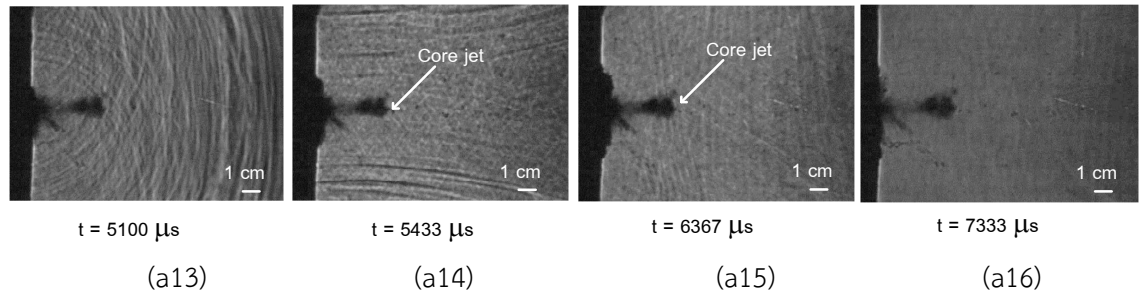
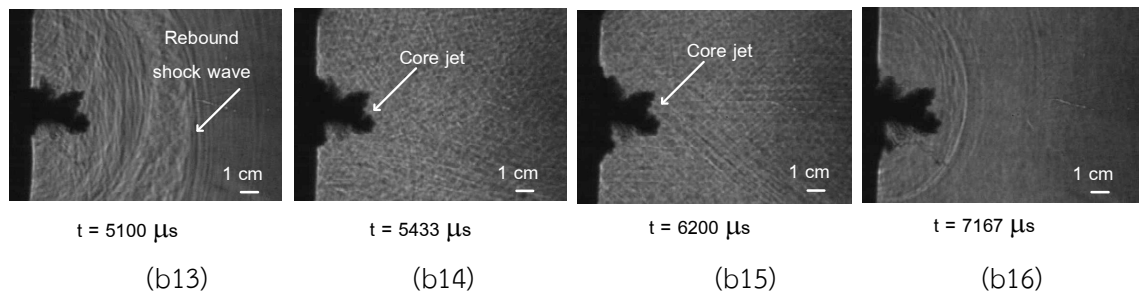
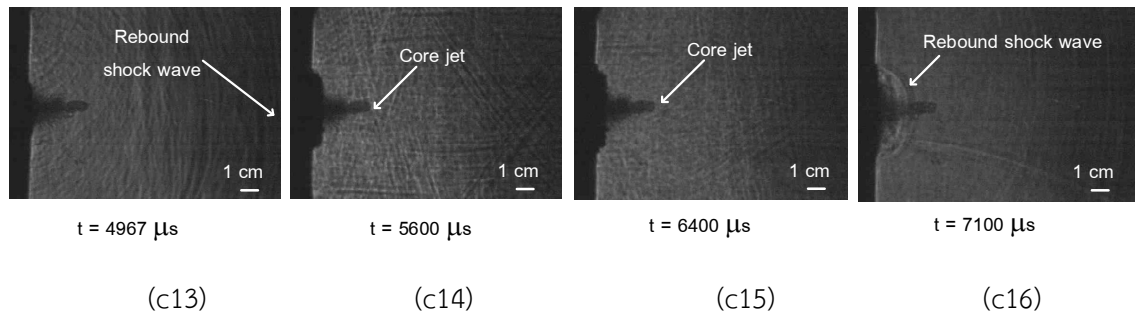
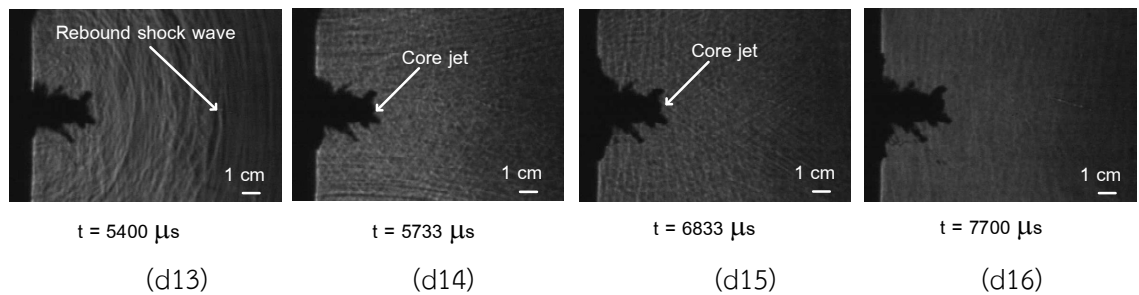
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ


 (a) Milk jet ($V_{j, \max} = 228.93 \text{ m/s}$)

 (b) Salad dressing jet ($V_{j, \max} = 199.67 \text{ m/s}$)

 (c) Tomato sauce jet ($V_{j, \max} = 175.62 \text{ m/s}$)

 (d) Toothpaste jet ($V_{j, \max} = 233.72 \text{ m/s}$)

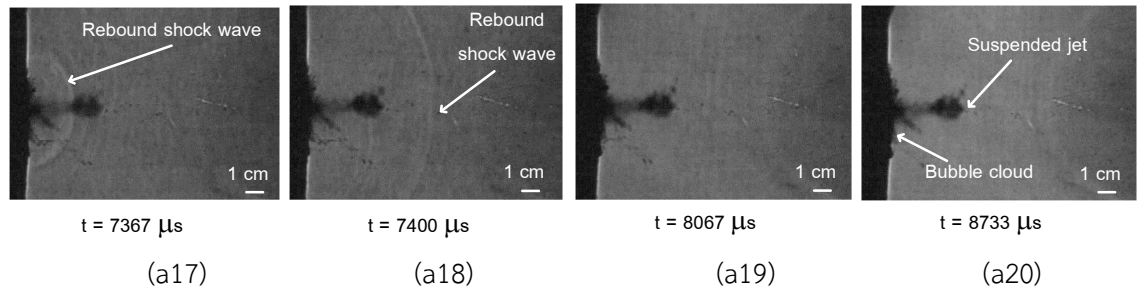
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)


 (a) Milk jet ($V_{j, \max} = 228.93 \text{ m/s}$)

 (b) Salad dressing jet ($V_{j, \max} = 199.67 \text{ m/s}$)

 (c) Tomato sauce jet ($V_{j, \max} = 175.62 \text{ m/s}$)

 (d) Toothpaste jet ($V_{j, \max} = 233.72 \text{ m/s}$)

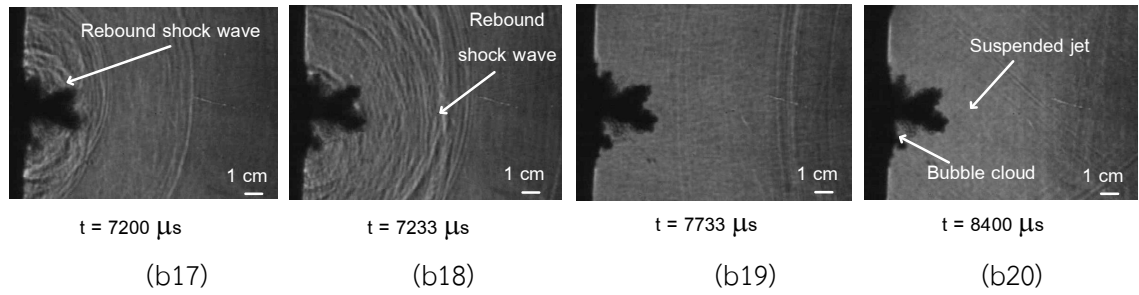
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)


 (a) Milk jet ($V_{j, \max} = 228.93 \text{ m/s}$)

 (b) Salad dressing jet ($V_{j, \max} = 199.67 \text{ m/s}$)

 (c) Tomato sauce jet ($V_{j, \max} = 175.62 \text{ m/s}$)

 (d) Toothpaste jet ($V_{j, \max} = 233.72 \text{ m/s}$)

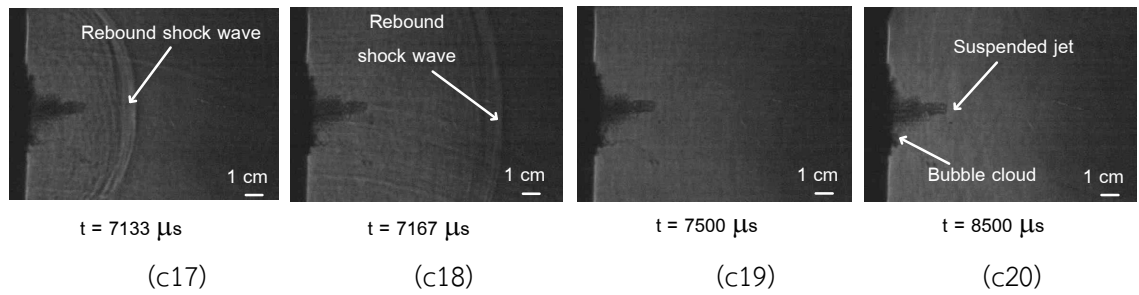
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



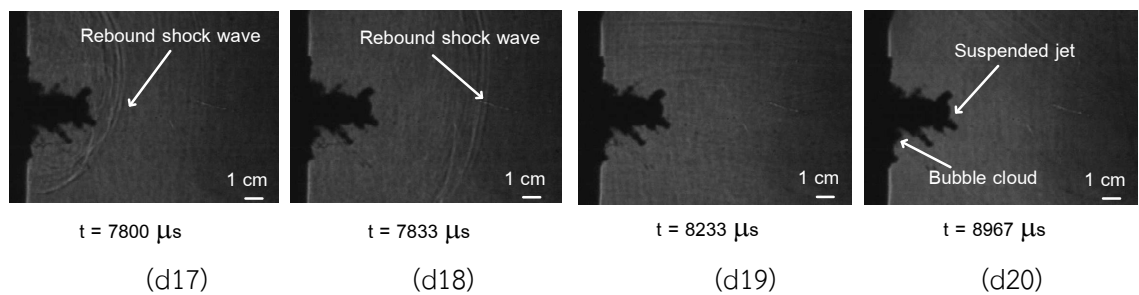
(a) Milk jet ($V_{j, \max} = 228.93 \text{ m/s}$)



(b) Salad dressing jet ($V_{j, \max} = 199.67 \text{ m/s}$)



(c) Tomato sauce jet ($V_{j, \max} = 175.62 \text{ m/s}$)

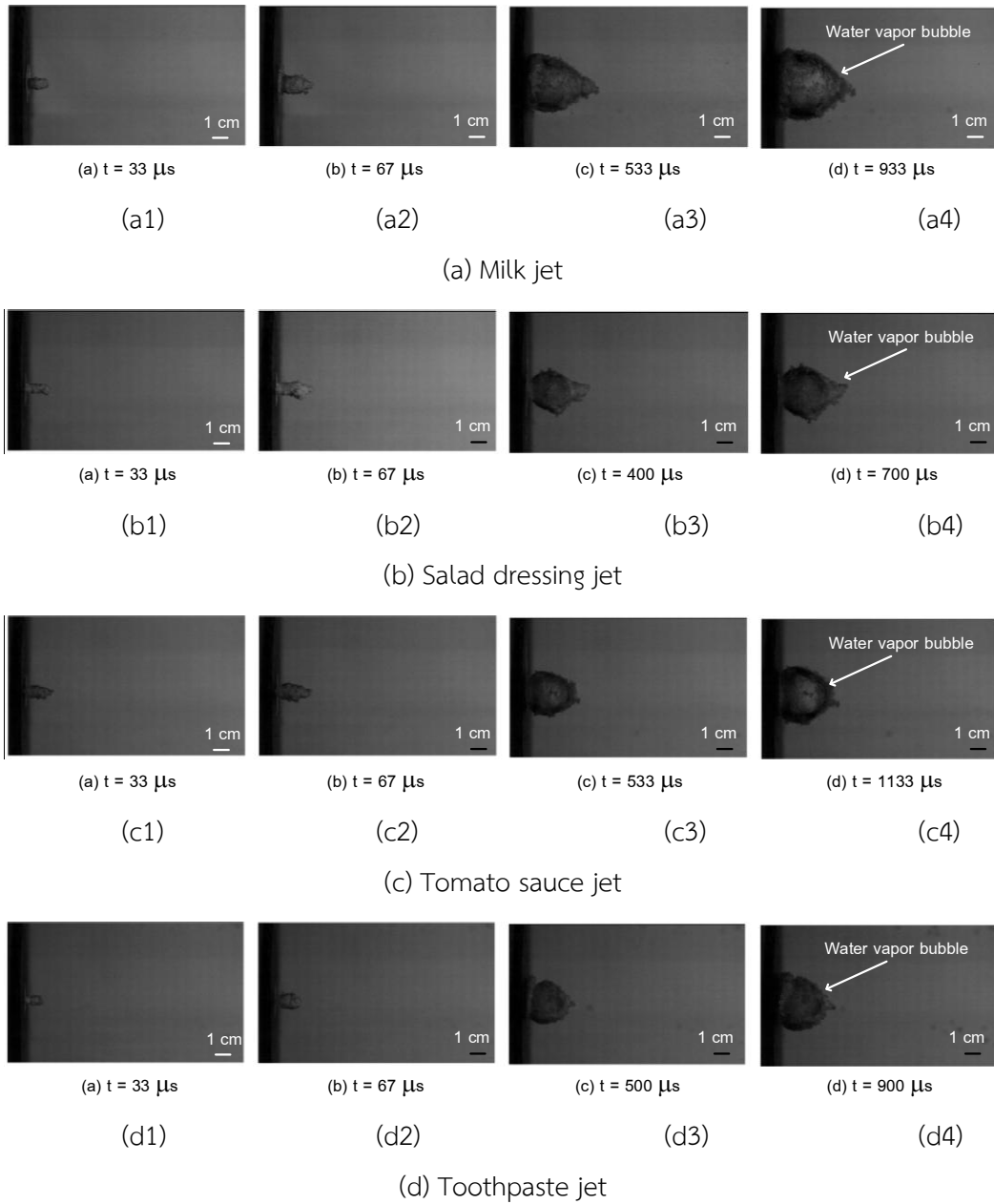


(d) Toothpaste jet ($V_{j, \max} = 233.72 \text{ m/s}$)

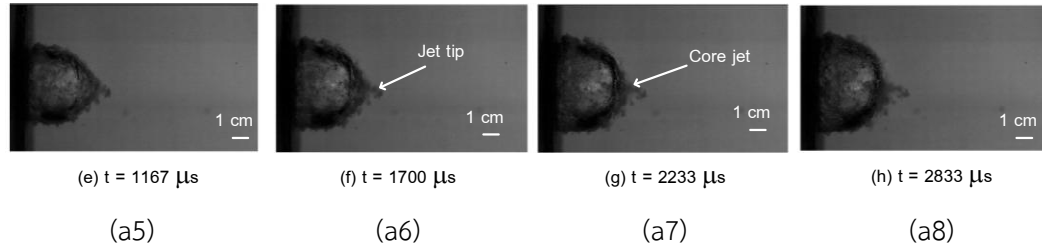
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)

รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ เมื่อพิจารณาเวลาเท่ากับ 33 - 67 μs พบ shock wave ในน้ำที่เกิดขึ้นจากลำพุ่งที่ฉีดออกมาจากหัวฉีดของลำพุ่งทั้ง 4 ชนิดอย่างเห็นได้ชัด จากนั้นการอธิบายเปรียบเทียบลักษณะหรือพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของลำพุ่งทั้ง 4 ชนิดจะทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าเวลาที่เกิดขึ้นของแต่ละลำพุ่งจะไม่เท่ากันก็ตาม เมื่อพิจารณารูปที่ 4.11(a3-d3) - 4.11(a4-d4) จะสังเกตเห็น vapor bubble ที่เกิดจากลำพุ่งทั้ง 3 ชนิดจะมีลักษณะกลมคล้ายกัน ยกเว้นที่เกิดจากลำพุ่งนม ซึ่งจะมีลักษณะเรียวยาวแหลมกว่าชนิดอื่นและ bubble จะขยายตัวในแนวนอนได้ไกลสุดดังรูปที่ 4.11(a5-d5) ซึ่งเมื่อพิจารณาที่เวลาจะพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งนมจะใช้เวลาในการขยายตัวในแนวนอนน้อยที่สุดที่เวลา 1,133 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในแนวนอนเร็วที่สุด ในขณะที่ลำพุ่งยาสีฟันใช้เวลามากที่สุดที่เวลา 1,767 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในแนวนอนช้าที่สุด จากนั้น bubble ทั้ง 4 ชนิดจะยุบตัวลงในแนวนอนดังรูปที่ 4.11(a6-d6) แต่จะยังคงขยายตัวในแนวตั้ง และขยายตัวใหญ่ที่สุดดังรูปที่ 4.11(a7-d7) ซึ่งพบว่า ลำพุ่งยาสีฟันกลับใช้เวลาในการขยายตัวในแนวตั้งน้อยที่สุดคือที่เวลา 1,967 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในแนวตั้งเร็วที่สุด ในขณะที่ลำพุ่งซอสมะเขือเทศกลับใช้เวลามากที่สุดคือ 2,500 μs หรือความเร็วในการขยายตัวในแนวตั้งช้าที่สุด จากนั้น bubble ของลำพุ่งทั้ง 4 ชนิดก็จะยุบตัวทั้งแนวนอนและแนวตั้งดังรูปที่ 4.11(a8-d8) - 4.16(a10-d10) โดยจะยุบตัวให้มีขนาดต่ำสุดในรูปที่ 4.11(a11-f11) ของลำพุ่งทั้ง 4 ชนิด โดยลำพุ่งซอสมะเขือเทศมีขนาดของ bubble เล็กที่สุดก่อน bubble ชนิดอื่นคือเกิดขึ้นที่เวลา 4,867 μs หรือความเร็วในการยุบตัวเร็วที่สุด ในขณะที่ bubble ของลำพุ่งยาสีฟันเกิดขึ้นช้าที่สุดคือที่เวลา 5,267 μs หรือความเร็วในการยุบตัวช้าที่สุด และจากรูปนี้ยังสังเกตเห็นการเกิด rebound shock wave และ compressed wave นอกจากนี้ยังสังเกตเห็น core jet อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่า core jet ของลำพุ่งนมมีความยาวมากที่สุดเมื่อเทียบกับลำพุ่งชนิดอื่น จากนั้น bubble ของลำพุ่งทั้ง 4 ชนิดก็จะแสดงพฤติกรรมการขยายตัวและยุบตัวของ bubble อีกครั้งเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้แล้วดังรูปที่ 4.11(a12-d12) - 4.11(a16-d16) ซึ่งจะสามารถสังเกตได้จาก compressed wave และ rebound shock wave ที่เกิดขึ้นอีกครั้งดังในรูปที่ 4.11(a17-d17) - 4.11(a20-d20)

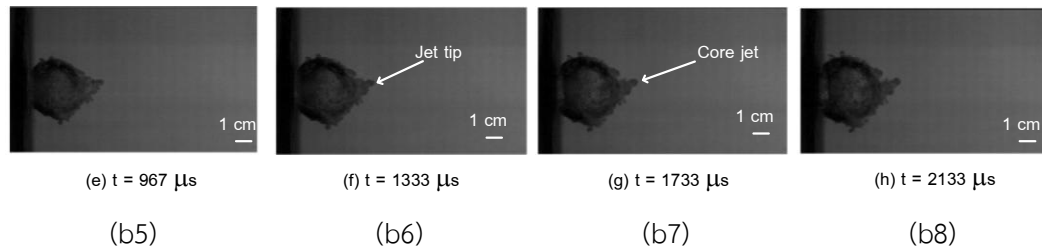
จากรูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ ถึงแม้ว่าเวลาที่เกิดขึ้นในแต่ละพฤติกรรมของลำพุ่งในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 จะไม่เท่ากันก็ตาม แต่รูปที่ 4.12 มีประโยชน์ในการช่วยให้เห็นพฤติกรรมที่การขยายตัวและยุบตัวของ bubble ที่ไม่ชัดเจนจากภาพถ่ายแบบ Shadowgraph ทั้งนี้ภาพแต่ละภาพ เช่น รูปที่ 4.11(a1) ก็จะสอดคล้องกับรูปที่ 4.12(a1) เป็นเช่นนี้ทุก ๆ ภาพ



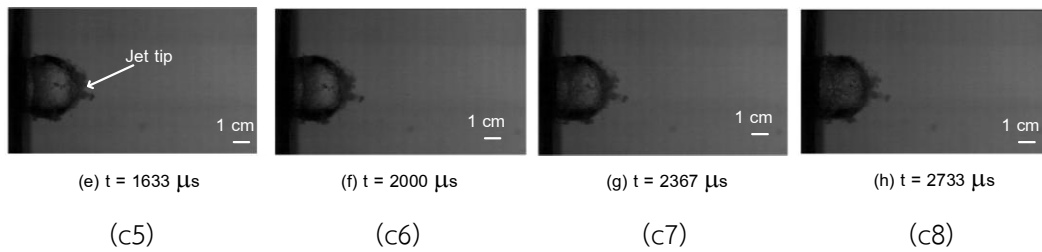
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ



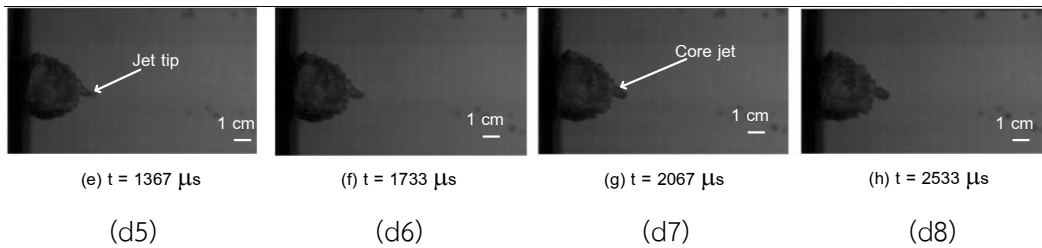
(a) Milk jet



(b) Salad dressing jet

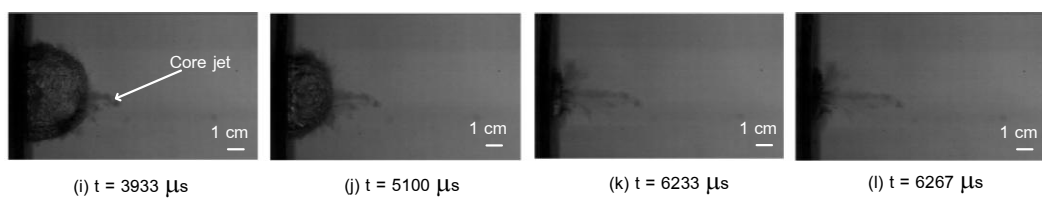


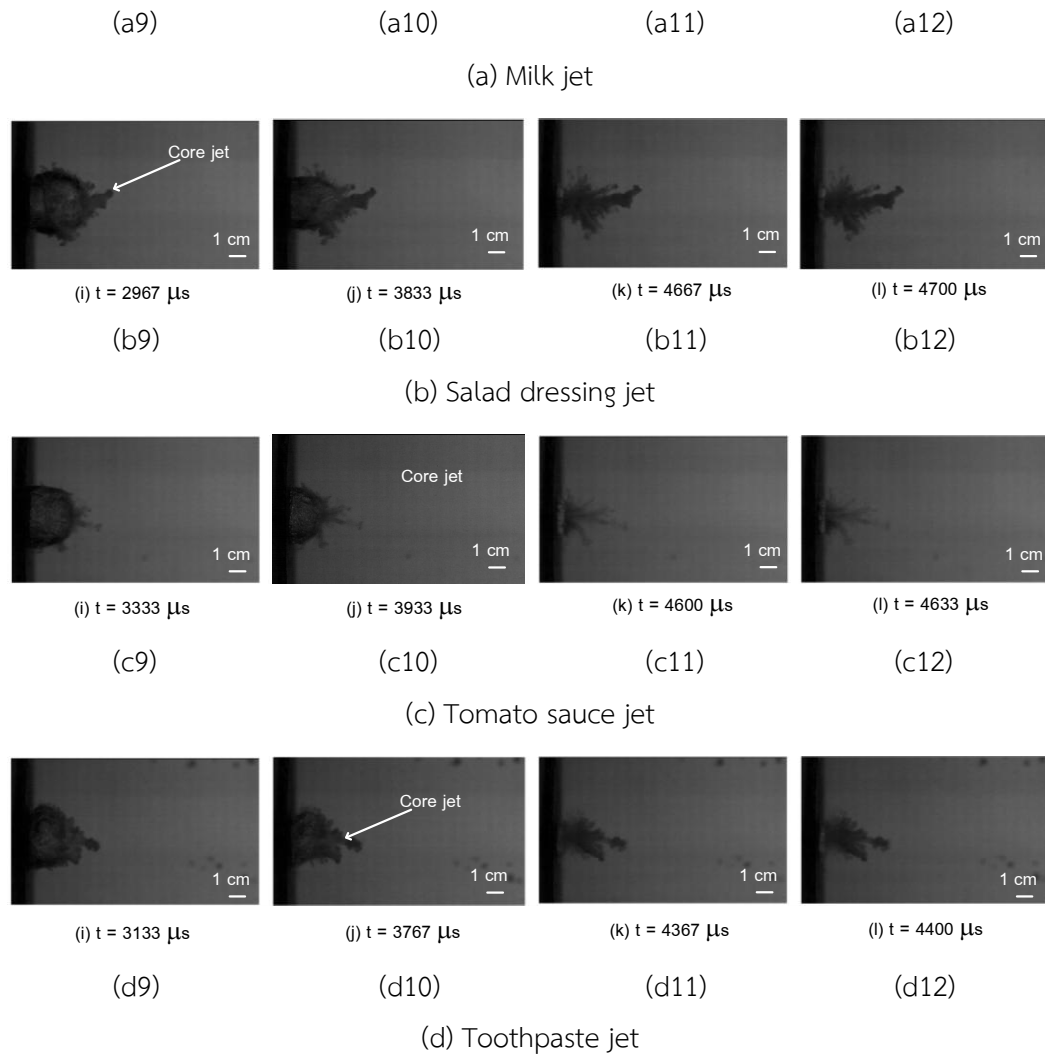
(c) Tomato sauce jet



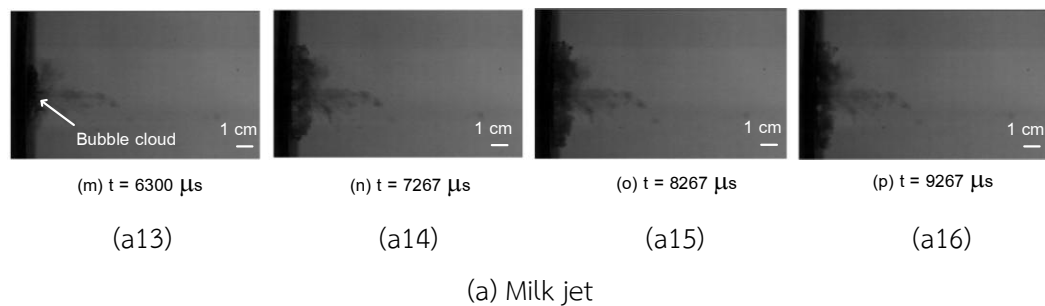
(d) Toothpaste jet

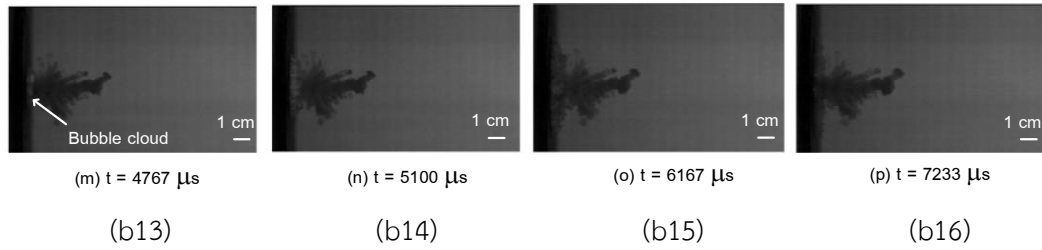
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



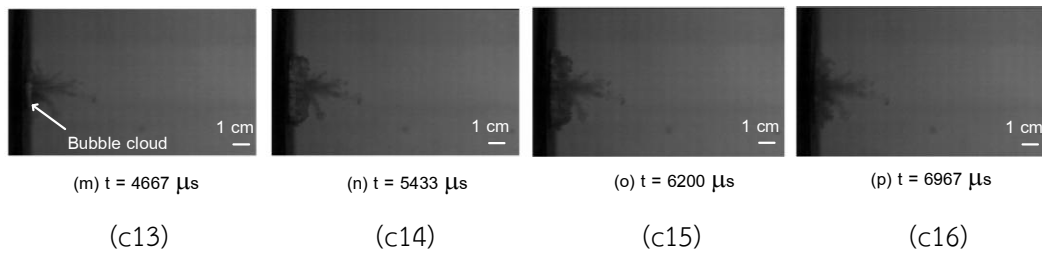


รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)

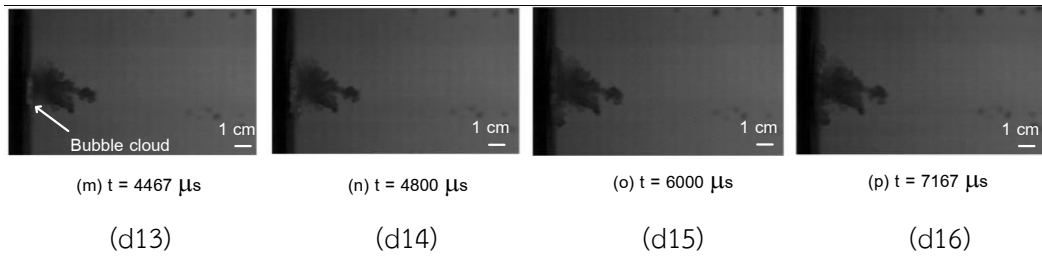




(b) Salad dressing jet

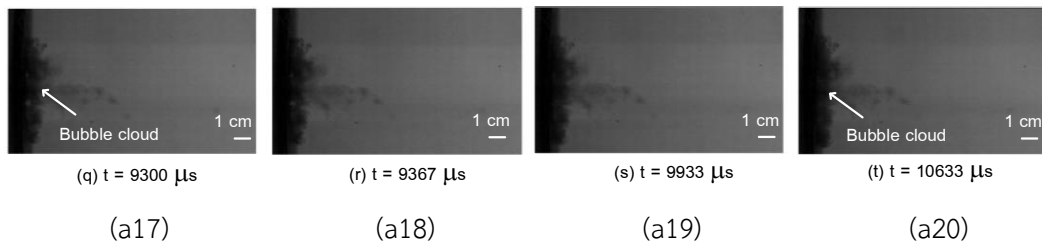


(c) Tomato sauce jet

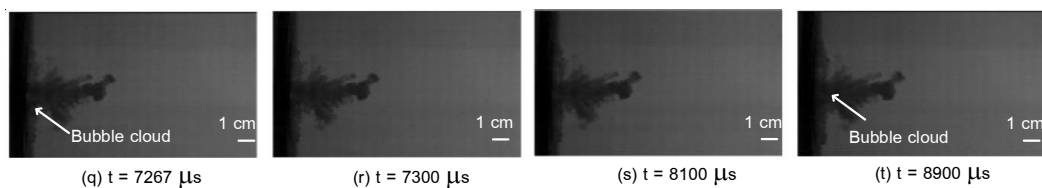


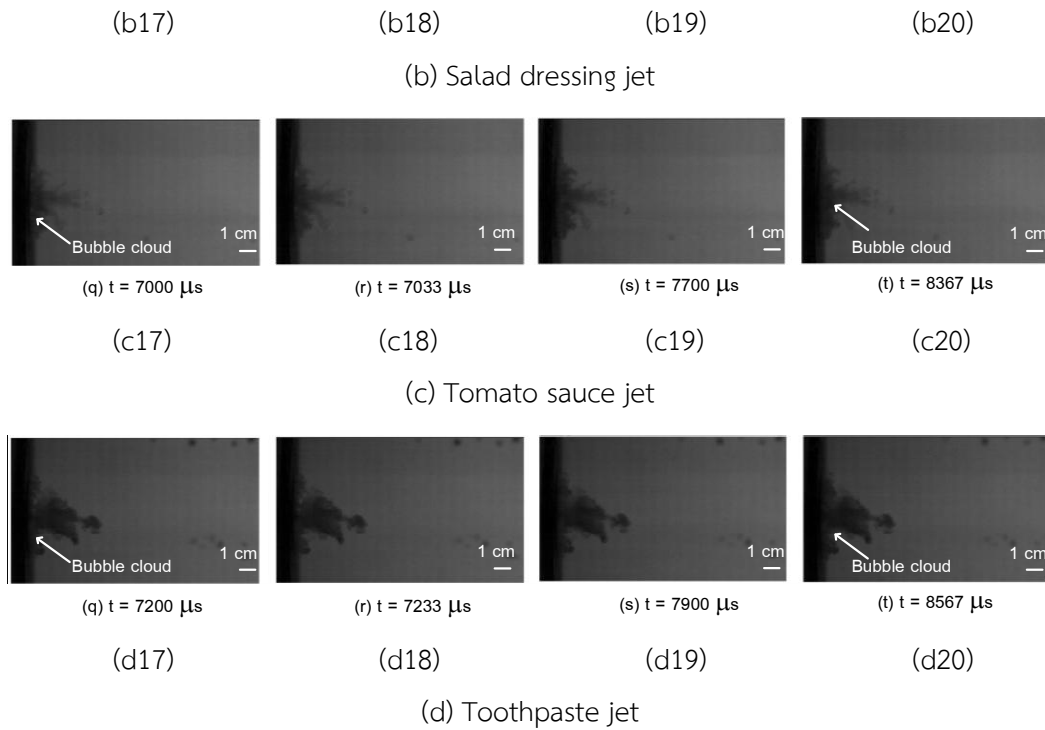
(d) Toothpaste jet

รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายโดยไม่ใช่เทคนิค shadowgraph ของลำพุงความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



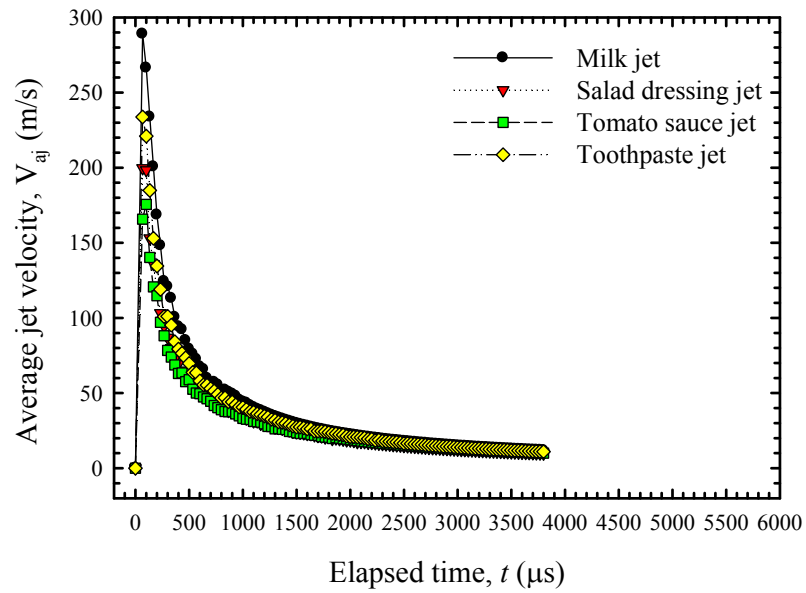
(a) Milk jet



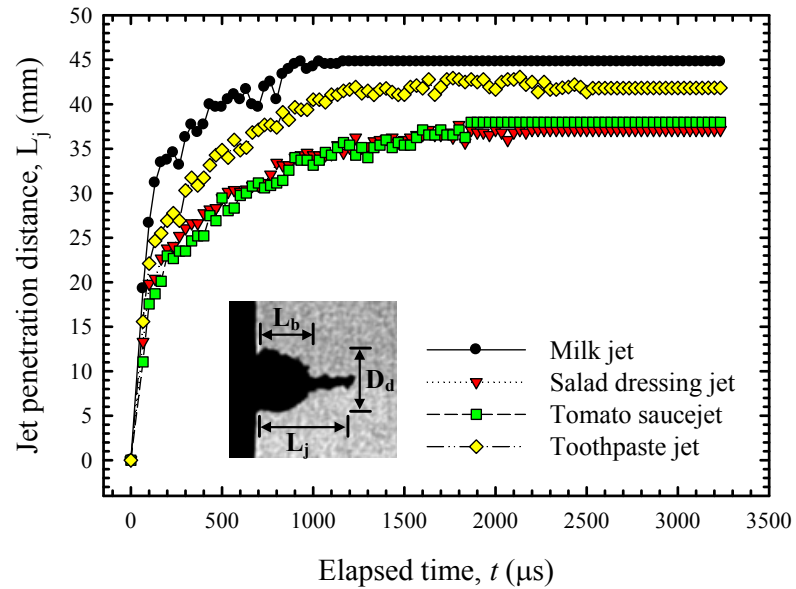


รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)

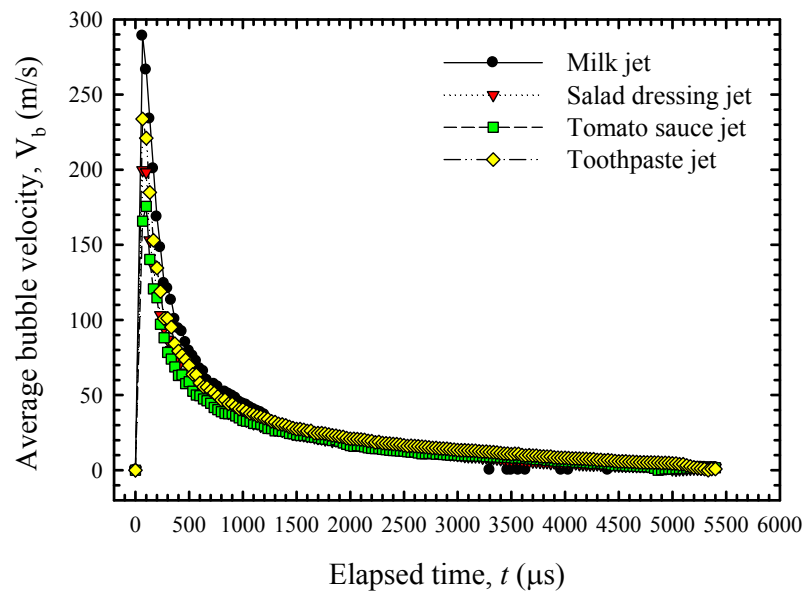
รูปที่ 4.13 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งในน้ำ (average jet velocity in water) ทั้ง 4 ชนิด พบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของลำพุงน้ำมันนมมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาคือ ยาสีฟัน น้ำสลัด และ ซอสมะเขือเทศ ตามลำดับ โดยมีความเร็วเท่ากับ 288.93 m/s, 233.72 m/s, 199.67 m/s และ 165.77 m/s ตามลำดับ โดยมีความเร็วสูงสุดที่เวลา 66 μs จากนั้นความเร็วของลำพุงจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจาก hydrodynamic drag จึงส่งผลกับระยะการเคลื่อนที่ของลำพุงสูงสุดของ ยาสีฟัน น้ำสลัด และซอสมะเขือเทศ ตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับ 44.76 mm, 41.84 mm, 37.11 mm และ 37.00 mm ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุงในน้ำ (average jet velocity in water) ทั้ง 4 ชนิด



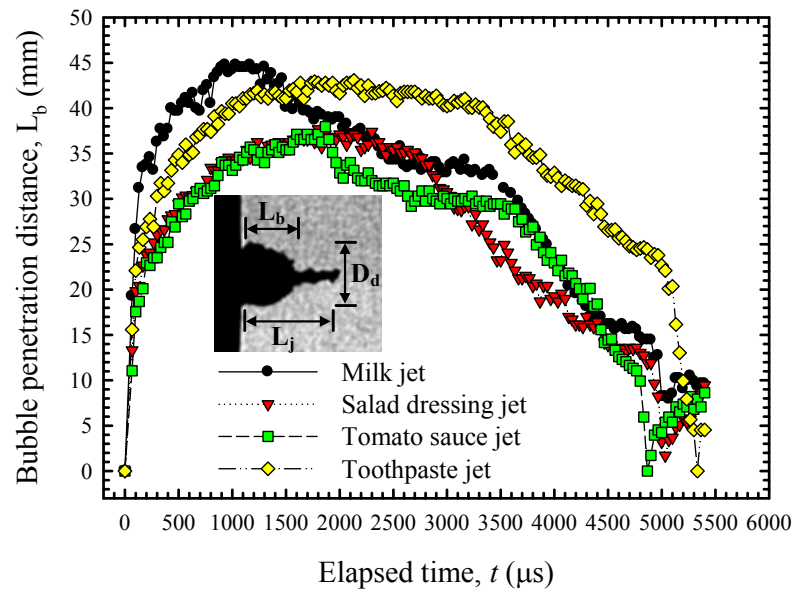
รูปที่ 4.14 ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุงในน้ำ (jet penetration distance in water) ทั้ง 4 ชนิด



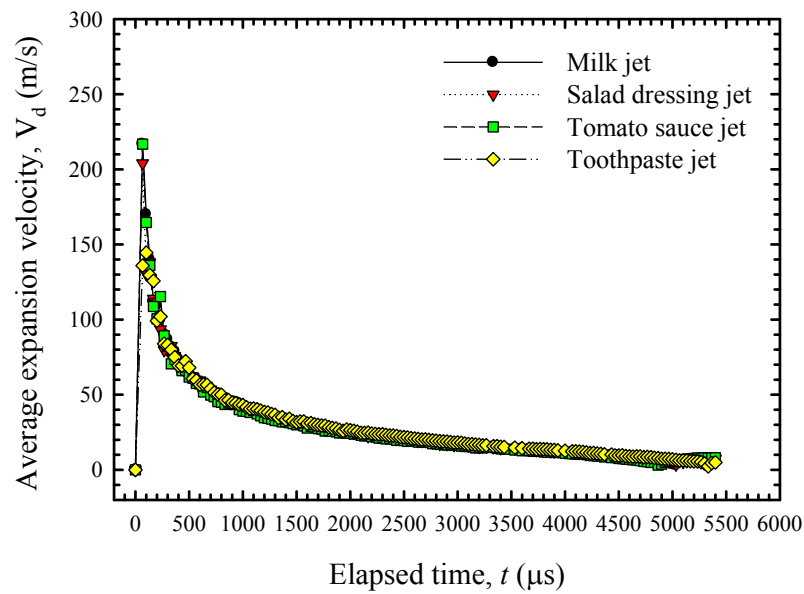
รูปที่ 4.15 ความเร็วเฉลี่ยของ bubble (average bubble velocity) ที่เกิดจากลำพ่นทั้ง 4 ชนิด

จากรูปที่ 4.15 แสดงความเร็วเฉลี่ยของ bubble (average bubble velocity) ที่เกิดจากลำพ่นทั้ง 4 ชนิด พบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของ bubble ที่เกิดจากลำพ่นนมมีความเร็วสูงสุด รองลงมาคือ ยาสีฟัน, น้ำสลัด และซอสมะเขือเทศ ตามลำดับ โดยมีความเร็วอยู่ที่ 288.92 m/s, 233.72 m/s, 199.67 m/s และ 165.77 m/s ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับความเร็วของลำพ่นดังรูปที่ 4.13

จากรูปที่ 4.16 แสดงระยะการเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration distance; L_b) ที่เกิดจากลำพ่นทั้ง 4 ชนิด พบว่า bubble ที่เกิดจากของลำพ่นนม น้ำสลัด ซอสมะเขือเทศ และยาสีฟัน ซึ่งพบว่า bubble จะค่อยๆ เคลื่อนที่ไปข้างหน้า โดยระยะการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเกิดขึ้นที่เวลา 1,167 μ s, 1,800 μ s, 1,866 μ s และ 2,133 μ s ตามลำดับ ซึ่งระยะการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 44.76 mm, 37.68 mm, 37.96 mm และ 43.06 mm ตามลำดับ หลังจากนั้น bubble จะค่อยๆ ยุบตัวลงจนถึงระยะต่ำสุด โดยพบว่าระยะการเคลื่อนที่ของ bubble ที่เกิดจากลำพ่นนมเคลื่อนที่ได้ไกลสุด รองลงมาคือ ยาสีฟัน ซอสมะเขือเทศ และน้ำสลัด ตามลำดับ ซึ่งเป็น Non-Newtonian fluid ชนิด Pseudoplastic, Dilatant, Plastic และ Bingham plastic ตามลำดับ

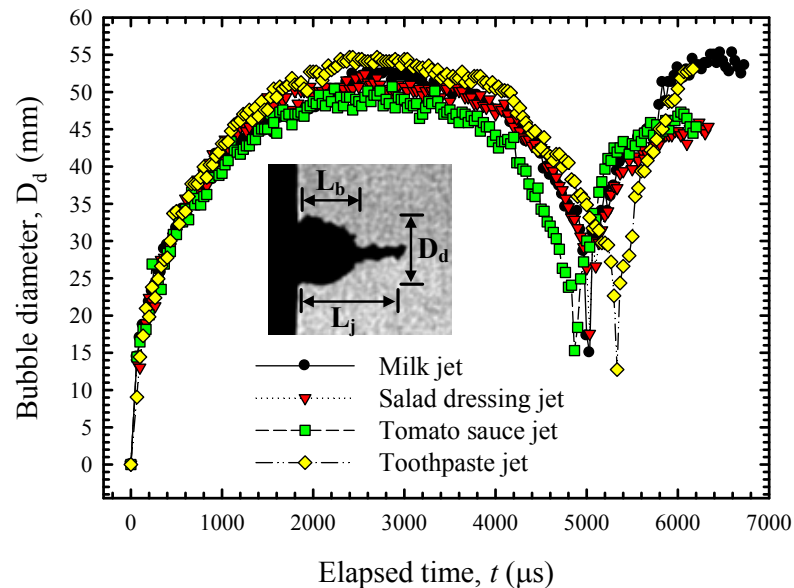


รูปที่ 4.16 ระยะการเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration distance, L_b) ที่เกิดจากลำพ่นทั้ง 4 ชนิด



รูปที่ 4.17 ความเร็วเฉลี่ยในการขยายตัวของ bubble (average expansion velocity of bubble) ของลำพ่นทั้ง 4 ชนิด

จากรูปที่ 4.17 แสดงความเร็วเฉลี่ยในการขยายตัวของ bubble (average expansion velocity of bubble) ของลำพู่ทั้ง 4 ชนิด พบว่า bubble ที่เกิดจากลำพู่นมและซอสมะเขือเทศมีความเร็วสูงสุดในการขยายตัวเร็วที่สุด โดยจะเกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ $66 \mu\text{s}$ รองลงมาคือ น้ำสลัด และ ยาสีฟัน ตามลำดับ โดยมีความเร็วเท่ากับ 261.77 m/s , 261.77 m/s , 204.02 m/s และ 135.91 m/s ตามลำดับ และมีความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ที่เกิดจากลำพู่ยาสีฟันสูงที่สุด รองลงมา คือ น้ำสลัด, นม และซอสมะเขือเทศ โดยมีค่าเท่ากับ 22.79 m/s , 22.42 m/s , 20.19 m/s และ 17.69 m/s ตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วเฉลี่ยในการยุบตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพู่ซอสมะเขือเทศมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาคือ นม, น้ำ, ยาสีฟัน และน้ำสลัด โดยมีค่าเท่ากับ 17.71 m/s , 16.40 m/s , 14.30 m/s และ 14.13 m/s ตามลำดับ

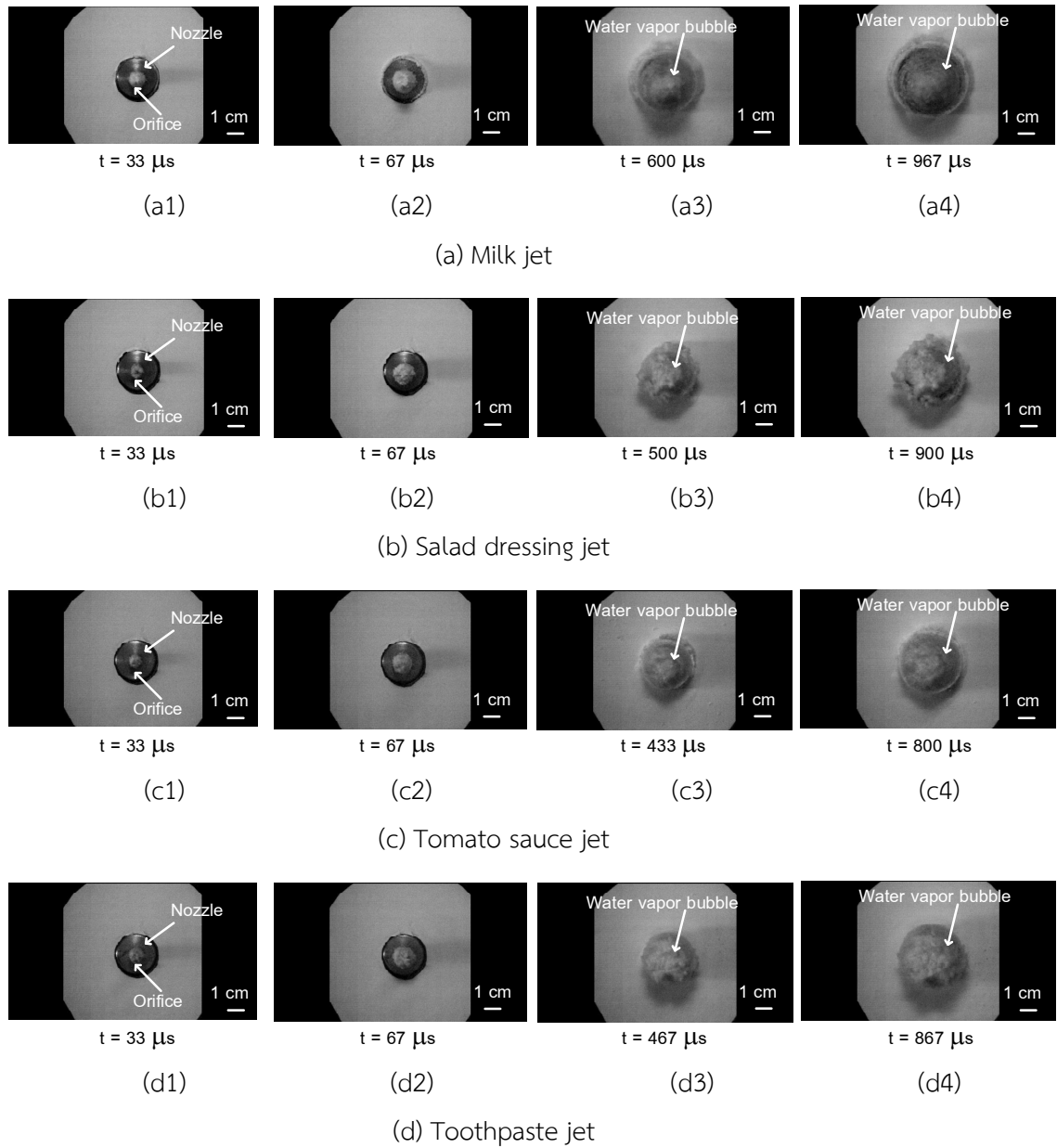


รูปที่ 4.18 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter, D_b) ของลำพู่ทั้ง 4 ชนิด

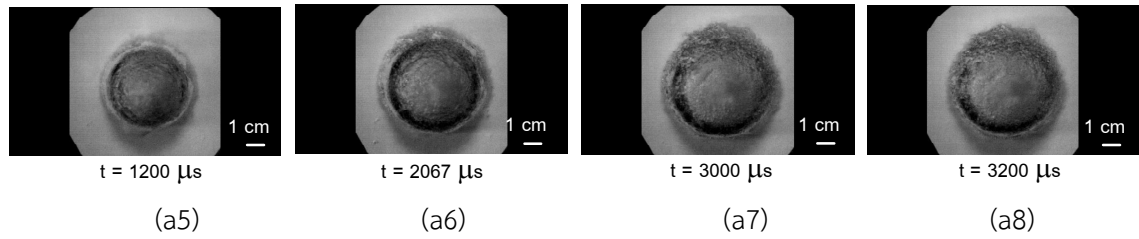
จากรูปที่ 4.18 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter; D_b) ของลำพู่ทั้ง 4 ชนิด พบว่า เส้นผ่าศูนย์กลาง bubble ที่กว้างที่สุดเกิดจากลำพู่ยาสีฟัน รองลงมาคือ นม, น้ำสลัด และซอสมะเขือเทศจะขยายตัวสูงที่สุดที่เวลา $2,400 \mu\text{s}$, $2,667 \mu\text{s}$, $2,567 \mu\text{s}$ และ $2,867 \mu\text{s}$ ตามลำดับ โดยมีขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 54.68 mm , 53.83 mm , 52.41 mm และ 50.71 mm ตามลำดับ จากนั้น bubble จะยุบตัวลงและจะเริ่มขยายตัวอีกครั้งที่เวลา $5,333 \mu\text{s}$, $5,033 \mu\text{s}$, $5,033 \mu\text{s}$ และ $4,867 \mu\text{s}$ ตามลำดับ

นอกจากการอธิบายคุณลักษณะของลำพู่ที่เกิดขึ้นจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองปกติโดยใช้และไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph ดังที่กล่าวมาแล้ว ยังทำการ

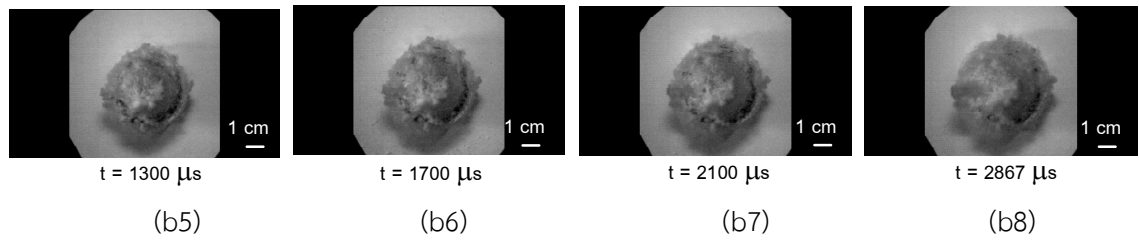
ถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph เพื่อช่วยอธิบายคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงเมื่อฉีดในน้ำจากของเหลวทั้ง 4 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.19 จากภาพพบว่า ที่เวลาเท่ากับ 33-67 μs (รูปที่ 4.19(a1-d1) และ 4.19(a2-d2)) bubble ซึ่งเกิดจากของลำพุ่งทั้ง 4 ชนิดจะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ เป็นลักษณะกลมเกือบสมมาตร และเมื่อพิจารณาที่รูปที่ 4.19(a3-d3) และ 4.19(a4-d4) จะสังเกตเห็น bubble ที่เป็นลักษณะกลมอย่างชัดเจน โดยที่ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งแต่ละชนิดจะมีขนาดแตกต่างกัน จากนั้น bubble ก็ขยายตัวขึ้น ดังรูปที่ 4.19(a5-d5) - 4.19(a6-d6) โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble กว้างที่สุด ดังรูปที่ 4.19(a7-d7) ซึ่งพบว่า ลำพุ่งน้ำสลับกับใช้เวลาในการขยายตัวน้อยที่สุดคือที่เวลา 2,100 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในแนวตั้งเร็วที่สุด ในขณะที่ลำพุ่งนมกลับใช้เวลามากที่สุดคือ 3,000 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในซ้าที่สุด จากนั้น bubble ของลำพุ่งทั้ง 4 ชนิดก็จะยุบตัวลงดังรูปที่ 4.19(a8-d8) - 4.19(a11-d11) โดยจะยุบตัวให้มีขนาดต่ำสุดในรูปที่ 4.19(a12-d12) ของลำพุ่งทั้ง 4 ชนิด โดยลำพุ่งซอสมะเขือเทศมีขนาดของ bubble เล็กที่สุดก่อน bubble ของลำพุ่งชนิดอื่นคือ เกิดขึ้นที่เวลา 4,400 μs หรือความเร็วในการยุบตัวเร็วที่สุด ในขณะที่ bubble ของลำพุ่งนมเกิดขึ้นช้าที่สุดคือที่เวลา 5,767 μs หรือความเร็วในการยุบตัวช้าที่สุด หลังจากเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ลดขนาดถึงจุดต่ำสุด bubble จะแตกตัวเป็นกลุ่ม bubble (bubble cloud) ดังรูปที่ 4.19(a13-d13) - 4.19(a16-d16) และจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเป็นลักษณะรูปวงแหวนรอบๆ หัวฉีด โดย bubble มีการยุบตัวอย่างช้าๆ ก่อนที่จะหายไปดังรูปที่ 4.19(a17-d17) - 4.19(a20-d20)



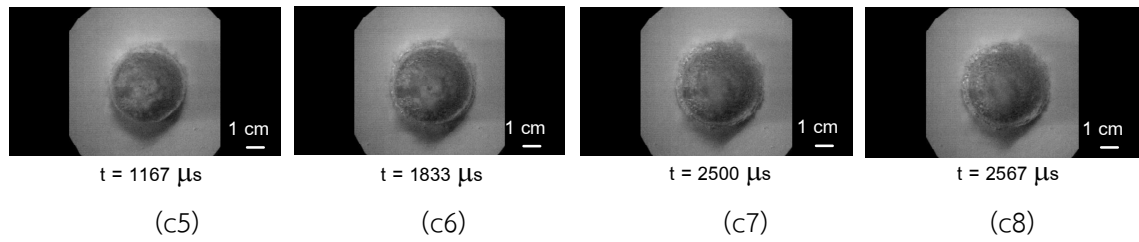
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิด
เมื่อฉีดในน้ำ



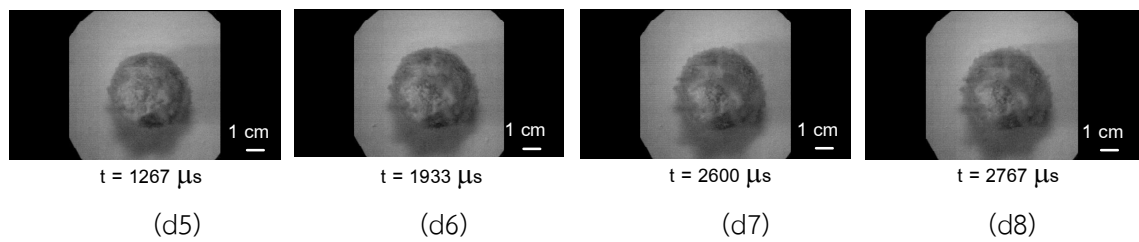
(a) Milk jet



(b) Salad dressing jet

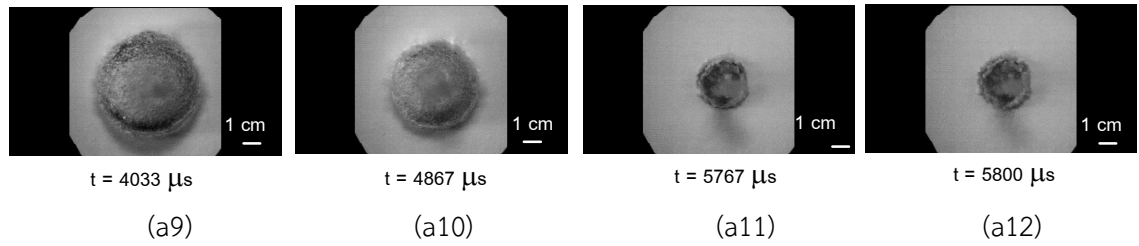


(c) Tomato sauce jet

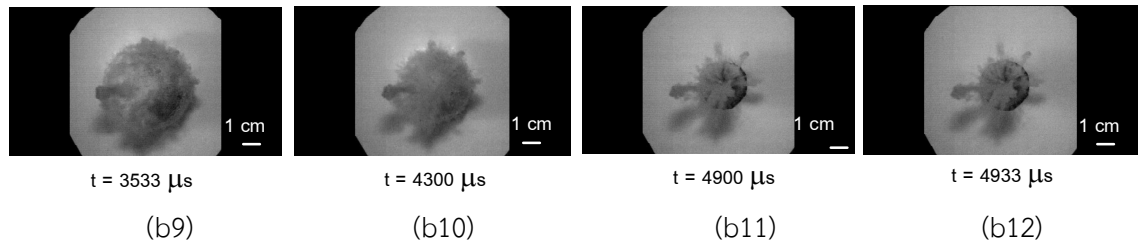


(d) Toothpaste jet

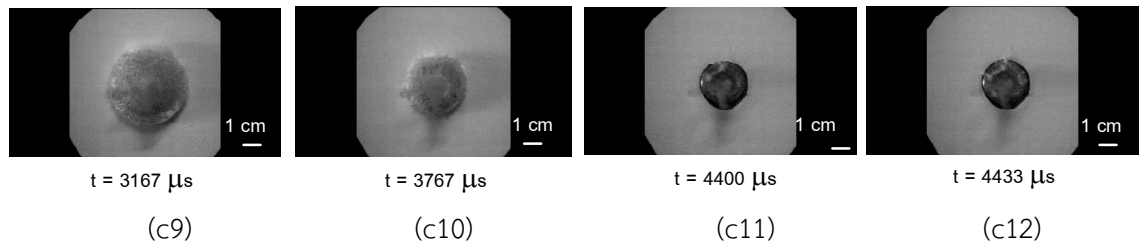
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิด เมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



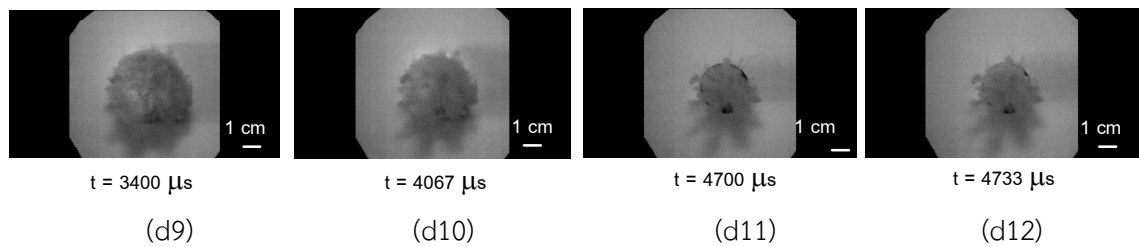
(a) Milk jet



(b) Salad dressing jet

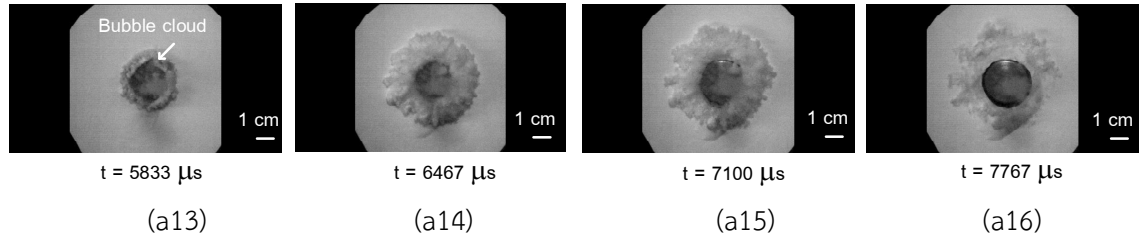


(c) Tomato sauce jet

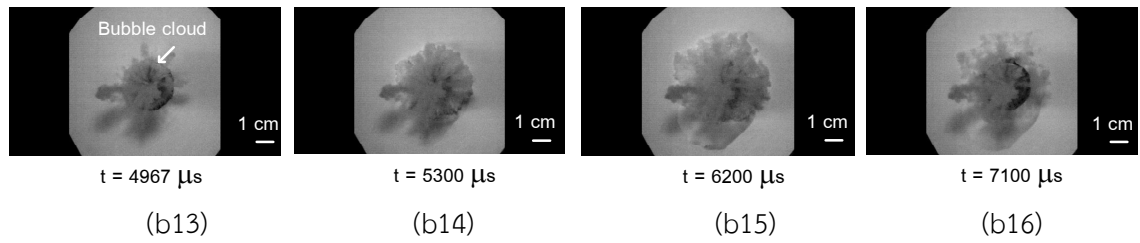


(d) Toothpaste jet

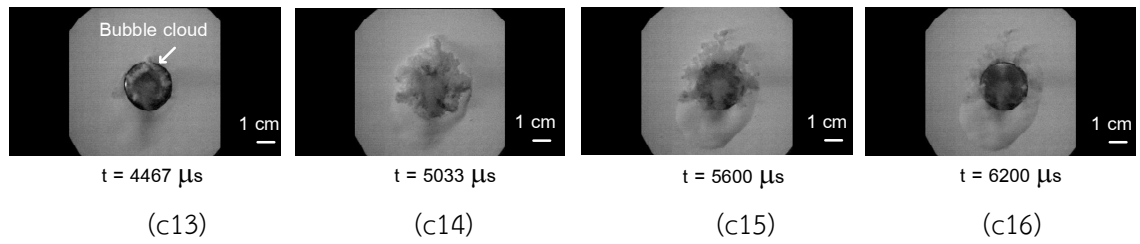
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิด
 เมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



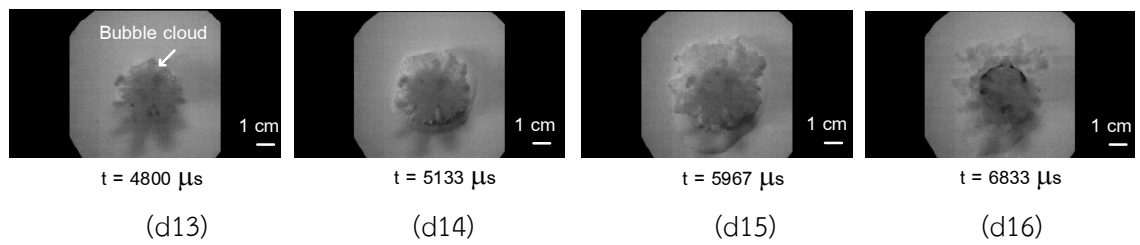
(a) Milk jet



(b) Salad dressing jet

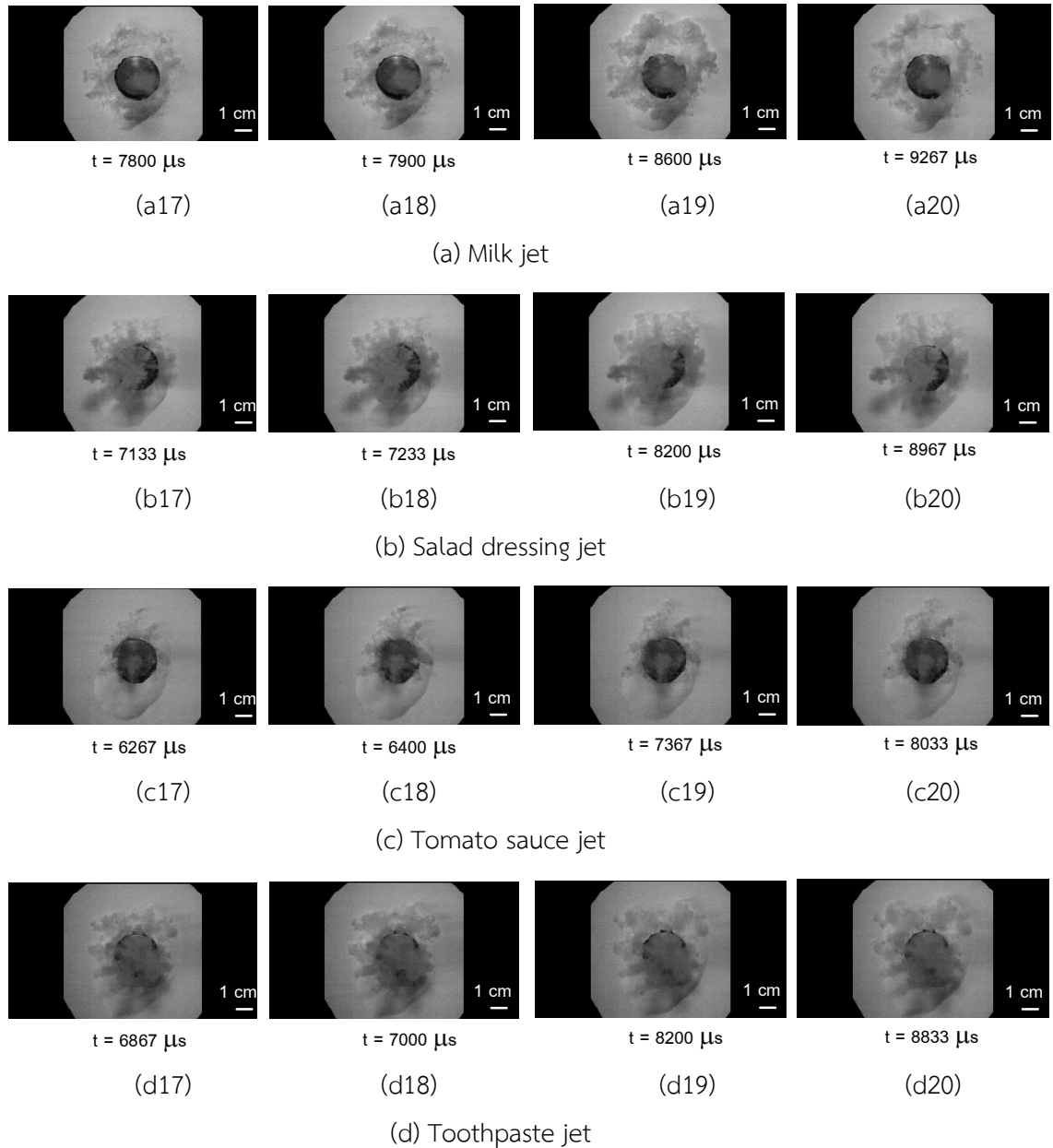


(c) Tomato sauce jet



(d) Toothpaste jet

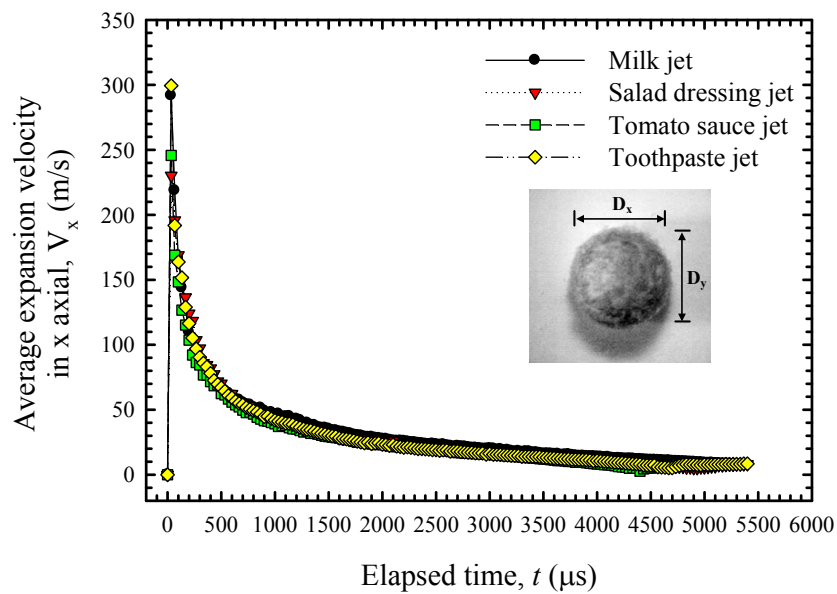
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิด
 เมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 4 ชนิด เมื่อฉีดในน้ำ

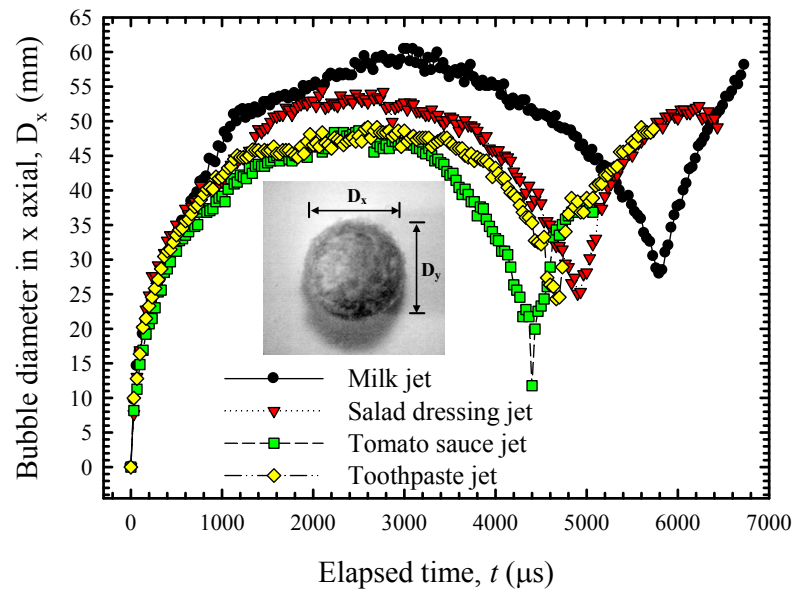
รูปที่ 4.20 แสดงความเร็วการขยายตัวของ bubble ในแนวนอน (average expansion velocity of bubble in x axial; V_x) ของลำพุ่งทั้ง 4 ชนิด จากรูปพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งยาสีฟันมีความเร็วในการขยายตัวสูงสุด โดยจะเกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ $33 \mu s$ รองลงมาคือ นม, ซอสมะเขือเทศ และน้ำสลัด ตามลำดับ โดยมีความเร็วเท่ากับ 299.43 m/s , 291.63 m/s , 245.72 m/s และ

230.12 m/s ตามลำดับ และมีความเร็วในการขยายตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพ่นน้ำสลัดสูงที่สุด รองลงมา คือ นม ซอสมะเขือเทศ และยาสีฟัน โดยมีค่าเท่ากับ 25.95 m/s, 20.13 m/s, 19.45 m/s และ 18.90 m/s ตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วเฉลี่ยในการยุบตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพ่นซอสมะเขือเทศมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาคือ ยาสีฟัน นม และน้ำสลัด โดยมีค่าเท่ากับ 19.40 m/s, 12.01 m/s, 11.75 m/s และ 10.51 m/s ตามลำดับ

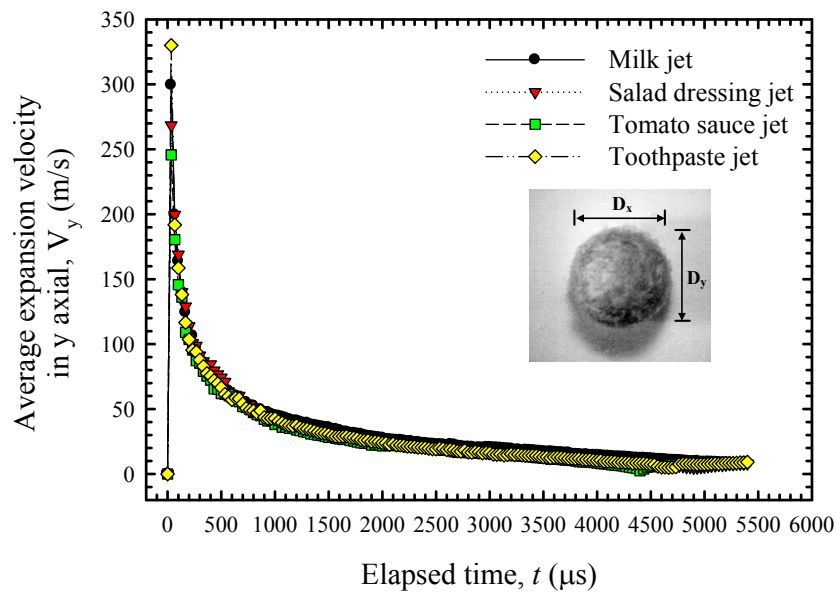


รูปที่ 4.20 ความเร็วในการขยายตัวของ bubble ในแนวนอน (average expansion velocity of bubble in x axial, V_x) ของลำพ่นทั้ง 4 ชนิด

รูปที่ 4.21 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (bubble diameter in x axial; D_x) ของลำพ่นทั้ง 4 ชนิด จากรูปพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพ่นจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble กว้างที่สุดเกิดจากลำพ่นนม น้ำสลัด ยาสีฟัน และซอสมะเขือเทศ ที่เวลา 3,000 μs , 2,100 μs , 2,600 μs และ 2,500 μs ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (D_x) เท่ากับ 60.39 mm, 54.50 mm, 49.13 mm และ 48.62 mm ตามลำดับ จากนั้น bubble จะค่อยๆ ยุบตัวลง ซึ่งการยุบตัวของ bubble จนถึงขนาดต่ำสุดที่เวลา 5,767 μs , 4,900 μs , 4,633 μs และ 4,400 μs โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำสุดเท่ากับ 27.89 mm, 25.07 mm, 24.31 mm และ 11.77 mm ตามลำดับ จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวขึ้นอีกครั้ง

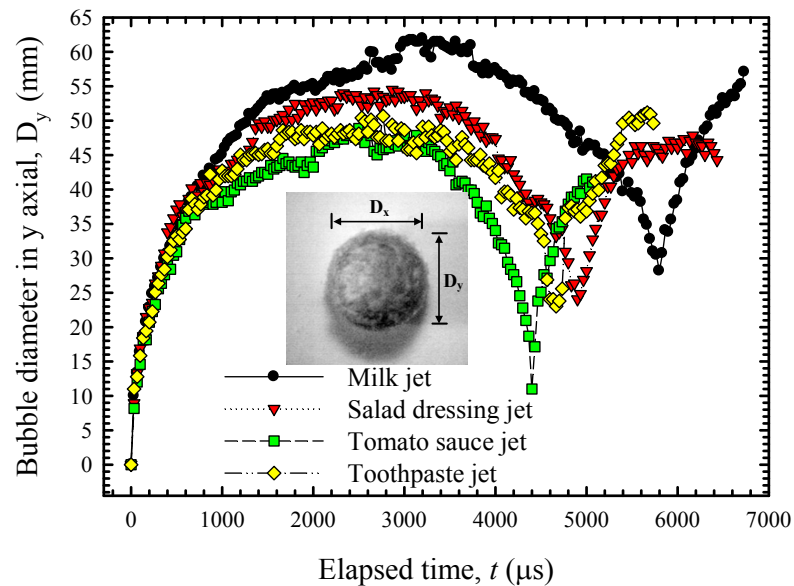


รูปที่ 4.21 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (bubble diameter in x axial, D_x) ของลำพุงทั้ง 4 ชนิด



รูปที่ 4.22 ความเร็วในการขยายตัวของ bubble ในแนวตั้ง (average expansion velocity of bubble in y axial, D_y) ของลำพุงทั้ง 4 ชนิด

รูปที่ 4.22 แสดงความเร็วในการขยายตัวของ bubble ในแนวตั้ง (average expansion velocity of bubble in y axial D_y) ของลำพู่ทั้ง 4 ชนิด จากรูปพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพู่ยาสีฟันมีความเร็วในการขยายตัวสูงสุด โดยจะเกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ $33\ \mu\text{s}$ รองลงมาคือ นม น้ำสลัด และซอสมะเขือเทศ ตามลำดับ โดยมีความเร็วเท่ากับ $330.03\ \text{m/s}$, $299.43\ \text{m/s}$, $268.53\ \text{m/s}$ และ $245.73\ \text{m/s}$ ตามลำดับ และมีความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ที่เกิดจากลำพู่น้ำมันนมนสูงที่สุด รองลงมา คือ น้ำสลัด, ยาสีฟัน และซอสมะเขือเทศ โดยมีค่าเท่ากับ $19.36\ \text{m/s}$, $19.01\ \text{m/s}$, $18.32\ \text{m/s}$ และ $18.25\ \text{m/s}$ ตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วเฉลี่ยในการยุบตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพู่ซอสมะเขือเทศมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำสลัด ยาสีฟัน และนม โดยมีค่าเท่ากับ $19.36\ \text{m/s}$, $14.98\ \text{m/s}$, $13.90\ \text{m/s}$ และ $13.16\ \text{m/s}$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวตั้ง (bubble diameter in y axial, D_y) ของลำพู่ทั้ง 4 ชนิด

รูปที่ 4.23 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวตั้ง (bubble diameter in y axial; D_y) ของลำพู่ทั้ง 4 ชนิด จากรูปพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพู่จะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble กว้างที่สุดเกิดจากลำพู่นม น้ำสลัด ยาสีฟัน และซอสมะเขือเทศ ที่เวลา $3,200\ \mu\text{s}$, $2,867\ \mu\text{s}$, $2,767\ \mu\text{s}$ และ $2,567\ \mu\text{s}$ ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (D_x) เท่ากับ $61.19\ \text{mm}$, $54.50\ \text{mm}$, $50.67\ \text{mm}$ และ $46.83\ \text{mm}$ ตามลำดับ จากนั้น bubble จะค่อยๆ ยุบตัวลง ซึ่งการยุบตัวของ bubble จนถึงขนาดต่ำสุดที่เวลา $4,400\ \mu\text{s}$, $4,900\ \mu\text{s}$, $4,733\ \mu\text{s}$, $3,867\ \mu\text{s}$, $4,000\ \mu\text{s}$ และ $5,767\ \mu\text{s}$ ตามลำดับ

โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ที่เกิดจากลำพุงขอสมะเขือเทศ น้ำสลัด ยาสีฟัน และนมต่ำสุดเท่ากับ 19.55 mm, 14.98 mm, 13.90 mm และ 13.16 mm ตามลำดับ จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวขึ้นอีกครั้ง โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองของลำพุงความเร็วสูงในน้ำสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำ

Liquid jet type	Jet		Bubble in normal view						Bubble in axial view					
	$V_{aj, m}$ (m/s)	$L_{j, m}$ (mm)	$L_{b, m}$ (mm)	$V_{b, e}$ (m/s)	$V_{b, c}$ (m/s)	$D_{d, m}$ (mm)	$V_{d, e}$ (m/s)	$V_{d, c}$ (m/s)	$D_{x, m}$ (mm)	$D_{y, m}$ (mm)	$V_{x, e}$ (m/s)	$V_{x, c}$ (m/s)	$V_{y, e}$ (m/s)	$V_{y, c}$ (m/s)
Milk jet	288.93	44.76 @ 1,167 μ s	44.76 @ 1,167 μ s	18.51	10.11	53.83 at t = 2,667 μ s	20.19	16.40	60.39 at t = 3,000 μ s	61.93 at t = 3,200 μ s	20.13	11.75	19.36	13.16
Salad dressing jet	199.67	37.68 at t = 1,800 μ s	37.68 at t = 1,800 μ s	20.94	11.13	52.41 at t = 2,567 μ s	20.42	14.13	54.50 at t = 2,100 μ s	54.50 at t = 2,867 μ s	25.95	10.51	19.01	14.98
Tomato sauce jet	175.62	37.96 at t = 1,867 μ s	37.96 at t = 1,867 μ s	20.34	12.65	50.71 at t = 2,867 μ s	17.69	17.71	48.62 at t = 2,500 μ s	46.83 at t = 2,567 μ s	19.45	19.40	18.25	19.55
Toothpaste jet	233.72	43.06 at t = 2,133 μ s	43.06 at t = 2,133 μ s	20.19	13.46	54.68 at t = 2,400 μ s	22.79	14.30	49.13 at t = 2,600 μ s	50.67 at t = 2,767 μ s	18.90	12.01	18.32	13.90

หมายเหตุ

$V_{aj, m}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของลำพุ่ง, m/s (Maximum average jet velocity)

$L_{j, m}$ คือ ระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของลำพุ่ง, mm (Maximum jet penetration distance)

$L_{b, m}$ คือ ระยะการเคลื่อนที่สูงสุดของ bubble, mm (Maximum bubble penetration distance)

$V_{b, e}$ คือ ความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ในมุมมองปกติ, m/s (Average expansion velocity of bubble in normal axial)

$V_{b, c}$ คือ ความเร็วในการยุบตัวเฉลี่ย bubble ในมุมมองปกติ, m/s (Average contraction velocity of bubble in normal axial)

$D_{d, m}$ คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกว้างที่สุดของ bubble, mm (Maximum bubble diameter)

$V_{d, e}$ คือ ความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ในแนวตั้ง, m/s (Average expansion velocity of bubble in y axial)

$V_{d, c}$ คือ ความเร็วในการยุบตัวเฉลี่ยของ bubble ในแนวตั้ง, m/s (Average contraction velocity of bubble in y axial)

$D_{x, m}$ คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกว้างที่สุดของ bubble ในแนวแกน x จากมุมมองในแนวแกน, mm (Maximum bubble diameter in x axial)

$D_{y, m}$ คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกว้างที่สุดของ bubble ในแนวแกน y จากมุมมองในแนวแกน, mm (Maximum bubble diameter in y axial)

$V_{x, e}$ คือ ความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ในแนวแกน x จากมุมมองในแนวแกน, m/s (Average expansion velocity of bubble in x axial)

$V_{x, c}$ คือ ความเร็วในการยุบตัวเฉลี่ยของ bubble ในแนวแกน x จากมุมมองในแนวแกน, m/s (Average contraction velocity of bubble in x axial)

$V_{y, e}$ คือ ความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ในแนวแกน y จากมุมมองในแนวแกน, m/s (Average expansion velocity of bubble in y axial)

$V_{y, c}$ คือ ความเร็วในการยุบตัวเฉลี่ยของ bubble ในแนวแกน y จากมุมมองในแนวแกน, m/s (Average contraction velocity of bubble in x axial)