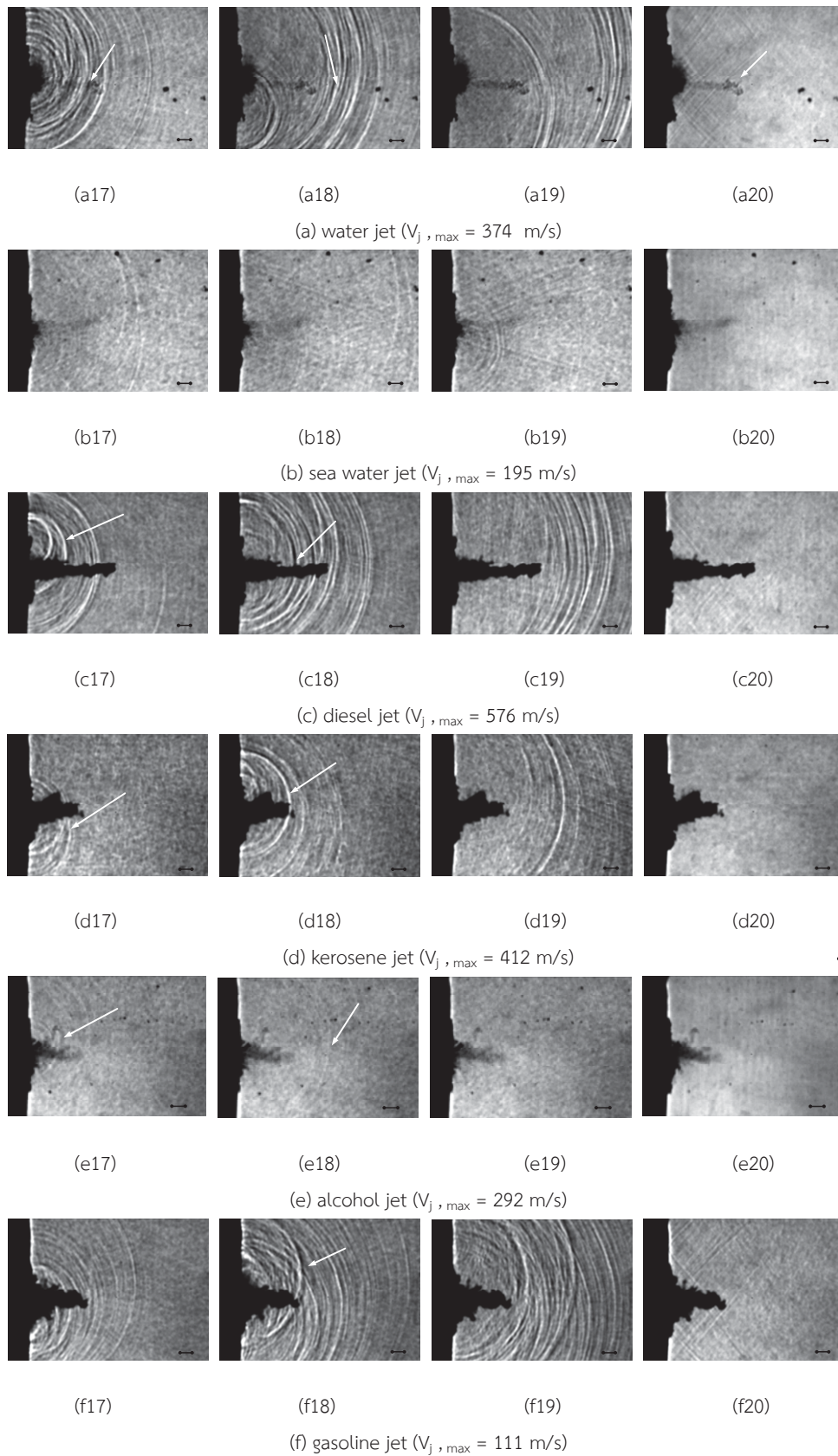
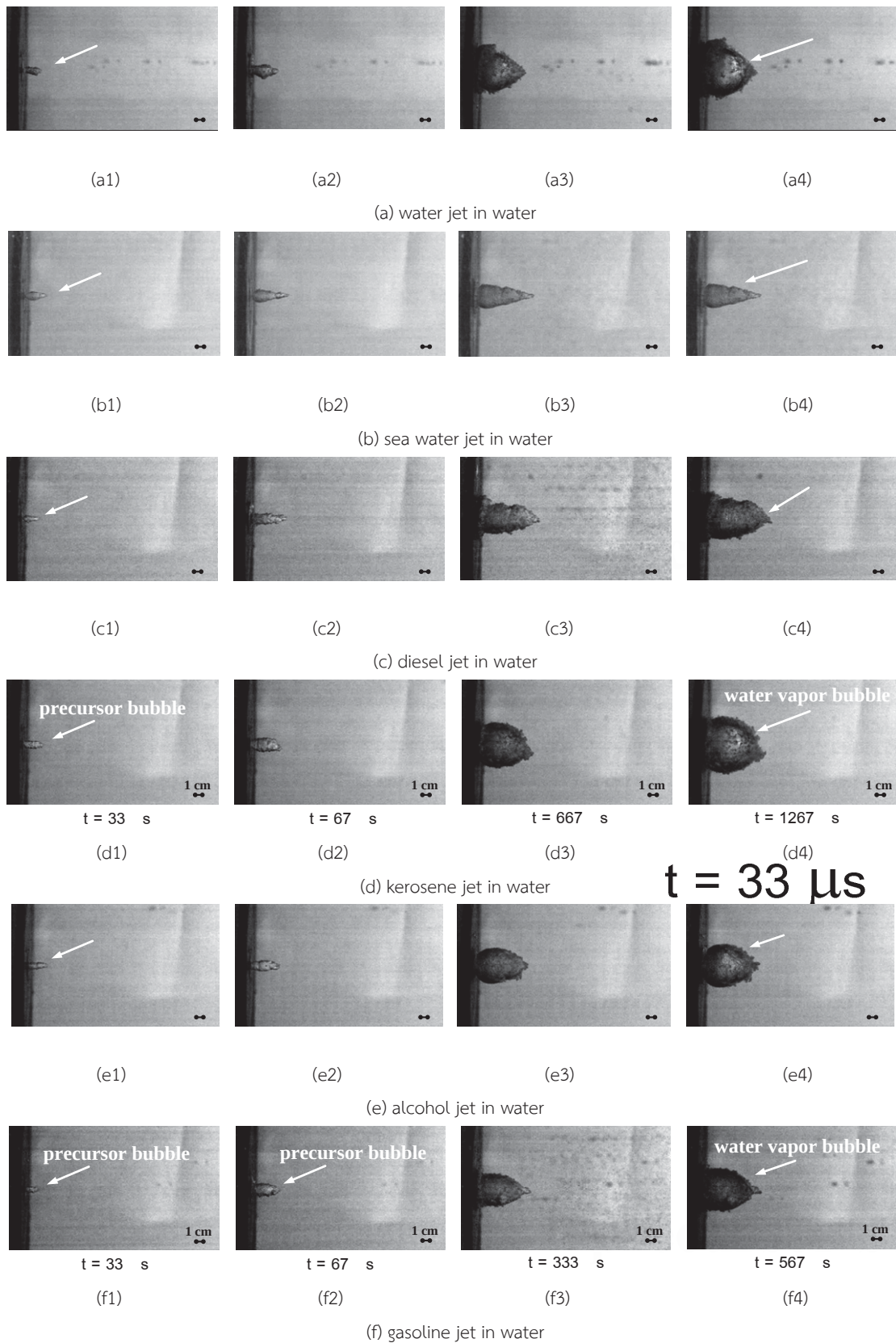




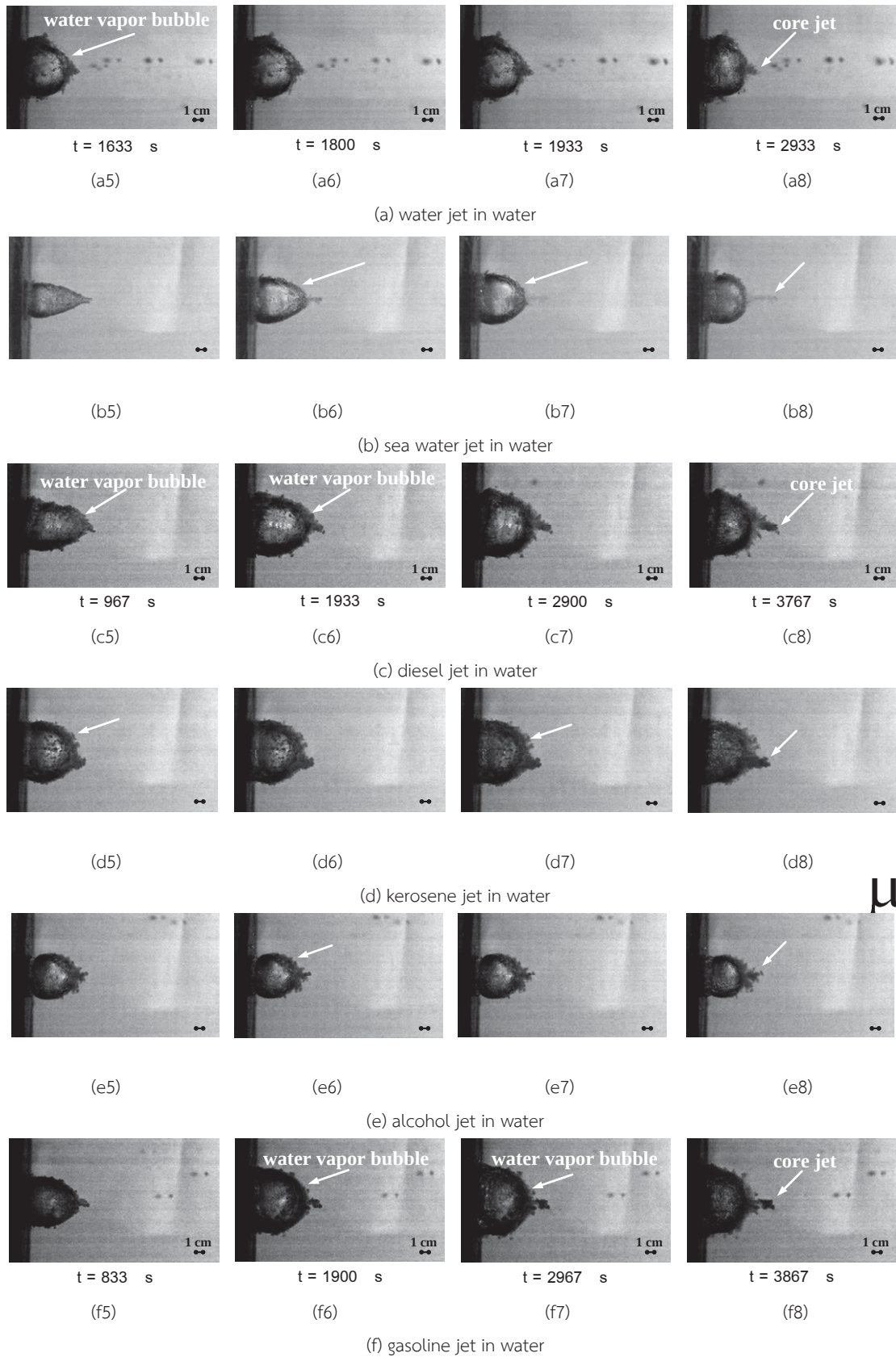
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)

รูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายด้วยเทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ เมื่อพิจารณาเวลาเท่ากับ 33 - 67 μs พบ shock wave ในน้ำที่เกิดขึ้นจากลำพุ่งที่ฉีดออกมาจากหัวฉีดของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดอย่างเห็นได้ชัด จากนั้นการอธิบายเปรียบเทียบลักษณะหรือพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดจะทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าเวลาที่เกิดขึ้นของแต่ละลำพุ่งจะไม่เท่ากับก็ตาม เมื่อพิจารณารูปที่ 4.16(a3-f3) - 4.16(a4-f4) จะสังเกตเห็น water vapor bubble ที่เกิดจากลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดจะมีลักษณะกลมคล้ายกัน ยกเว้นที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันก๊าดซึ่งจะมีลักษณะเรียวยาวแหลมกว่าชนิดอื่นและ bubble จะขยายตัวในแนวนอนได้ไกลสุดดังรูปที่ 4.16(a5-f5) ซึ่งเมื่อพิจารณาที่เวลาจะพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำทะเลจะใช้เวลาในการขยายตัวในแนวนอนน้อยที่สุดที่เวลา 1,067 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในแนวนอนเร็วที่สุดในขณะที่ลำพุ่งน้ำมันแก๊สโซลีนใช้เวลามากที่สุดที่เวลา 1,700 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในแนวนอนช้าที่สุด จากนั้น bubble ทั้ง 6 ชนิดจะยุบตัวลงในแนวนอนดังรูปที่ 4.16(a6-f6) แต่จะยังคงขยายตัวในแนวตั้ง และขยายตัวใหญ่ที่สุดดังรูปที่ 4.16(a7-f7) ซึ่งพบว่า ลำพุ่งน้ำมันดีเซลกลับใช้เวลาในการขยายตัวในแนวตั้งน้อยที่สุดคือที่เวลา 1,833 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในแนวตั้งเร็วที่สุดในขณะที่ลำพุ่งน้ำทะเลกลับใช้เวลามากที่สุดคือ 2,733 μs หรือความเร็วในการขยายตัวในแนวตั้งช้าที่สุด จากนั้น bubble ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดก็จะยุบตัวทั้งแนวนอนและแนวตั้งดังรูปที่ 4.16(a8-f8) - 4.16(a10-f10) โดยจะยุบตัวให้มีขนาดต่ำสุดในรูปที่ 4.16(a11-f11) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด โดยลำพุ่งดีเซลมีขนาดของ bubble เล็กที่สุดก่อน bubble ชนิดอื่นคือเกิดขึ้นที่เวลา 4,666 μs หรือความเร็วในการยุบตัวเร็วที่สุดในขณะที่ bubble ของลำพุ่งน้ำเกิดขึ้นช้าที่สุดคือที่เวลา 5,433 μs หรือความเร็วในการยุบตัวช้าที่สุด และจากรูปนี้ยังสังเกตเห็นการเกิด rebound shock wave และ compressed wave นอกจากนี้ยังสังเกตเห็น core jet อย่างชัดเจนสำหรับลำพุ่งน้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด แอลกอฮอล์และน้ำมันแก๊สโซลีน เนื่องจากความหนาแน่นของลำพุ่งดังกล่าวทั้ง 4 ชนิดไม่เท่ากับ ความหนาแน่นของของเหลว (น้ำ) ที่บรรจุในห้องทดสอบ เมื่อใช้การถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph ในขณะที่ core jet ของลำพุ่งน้ำและน้ำทะเลไม่สามารถสังเกตเห็นได้ นอกจากนี้ยังพบว่า core jet ของลำพุ่งน้ำมันมีความยาวมากที่สุดเมื่อเทียบกับลำพุ่งชนิดอื่น จากนั้น bubble ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดก็จะแสดงพฤติกรรมการขยายตัวและยุบตัวของ bubble อีกครั้งเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้แล้วดังรูปที่ 4.16(a12-f12) - 4.16(a16-f16) ซึ่งจะสามารถสังเกตได้จาก compressed wave และ rebound shock wave ที่เกิดขึ้นอีกครั้งดังในรูปที่ 4.16(a17-f17) - 4.16(a20-f20) ซึ่งพบว่าลำพุ่งน้ำมันก๊าดจะเกิดพฤติกรรมต่างๆ ได้เร็วที่สุดคือจะใช้เวลาเพียง 7,000 μs ในขณะที่ลำพุ่งแอลกอฮอล์เกิดได้ช้าที่สุดคือใช้เวลาทั้งสิ้น 7,567 μs

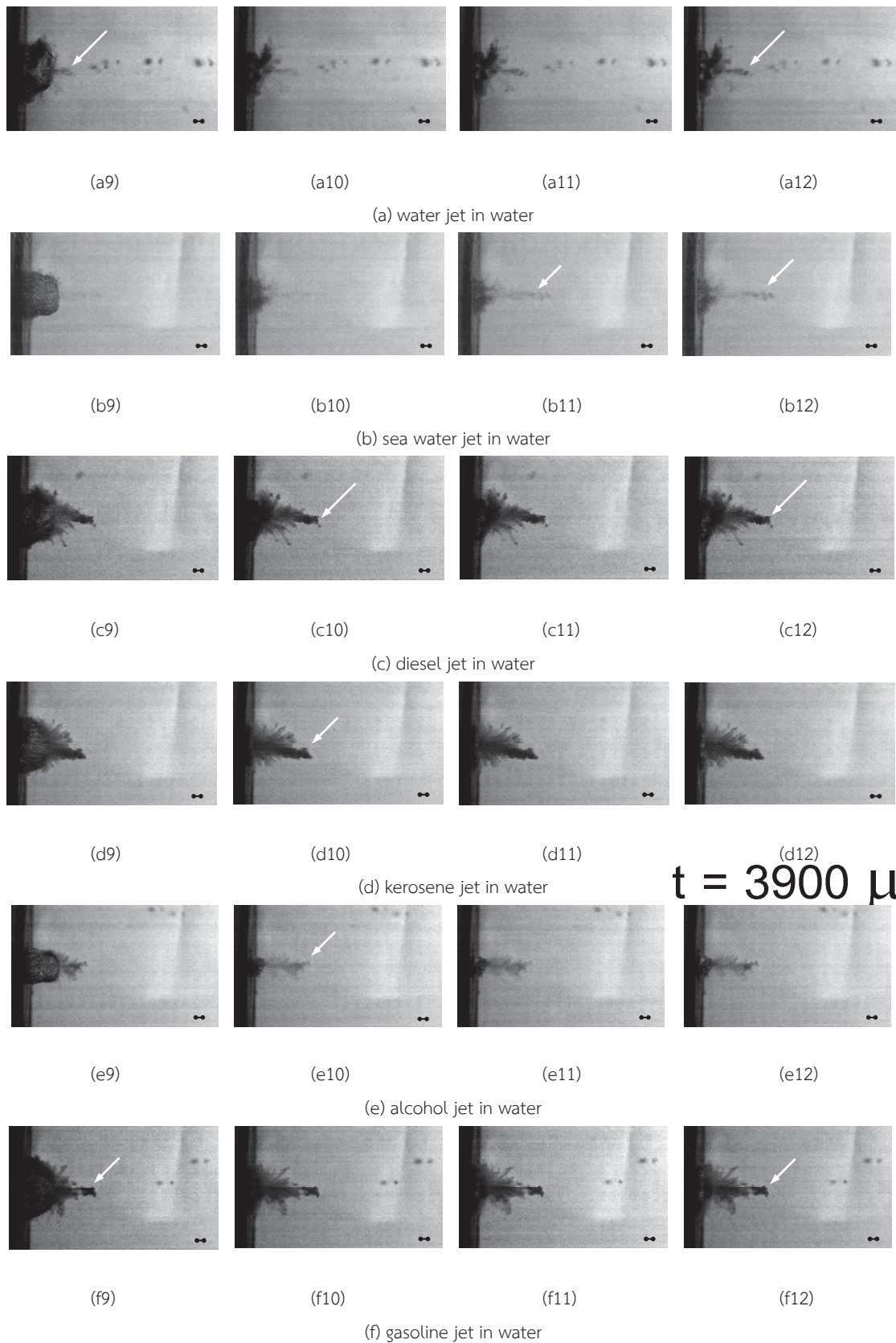


รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโดยไม่ใช่เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ

$t = 33 \mu\text{s}$

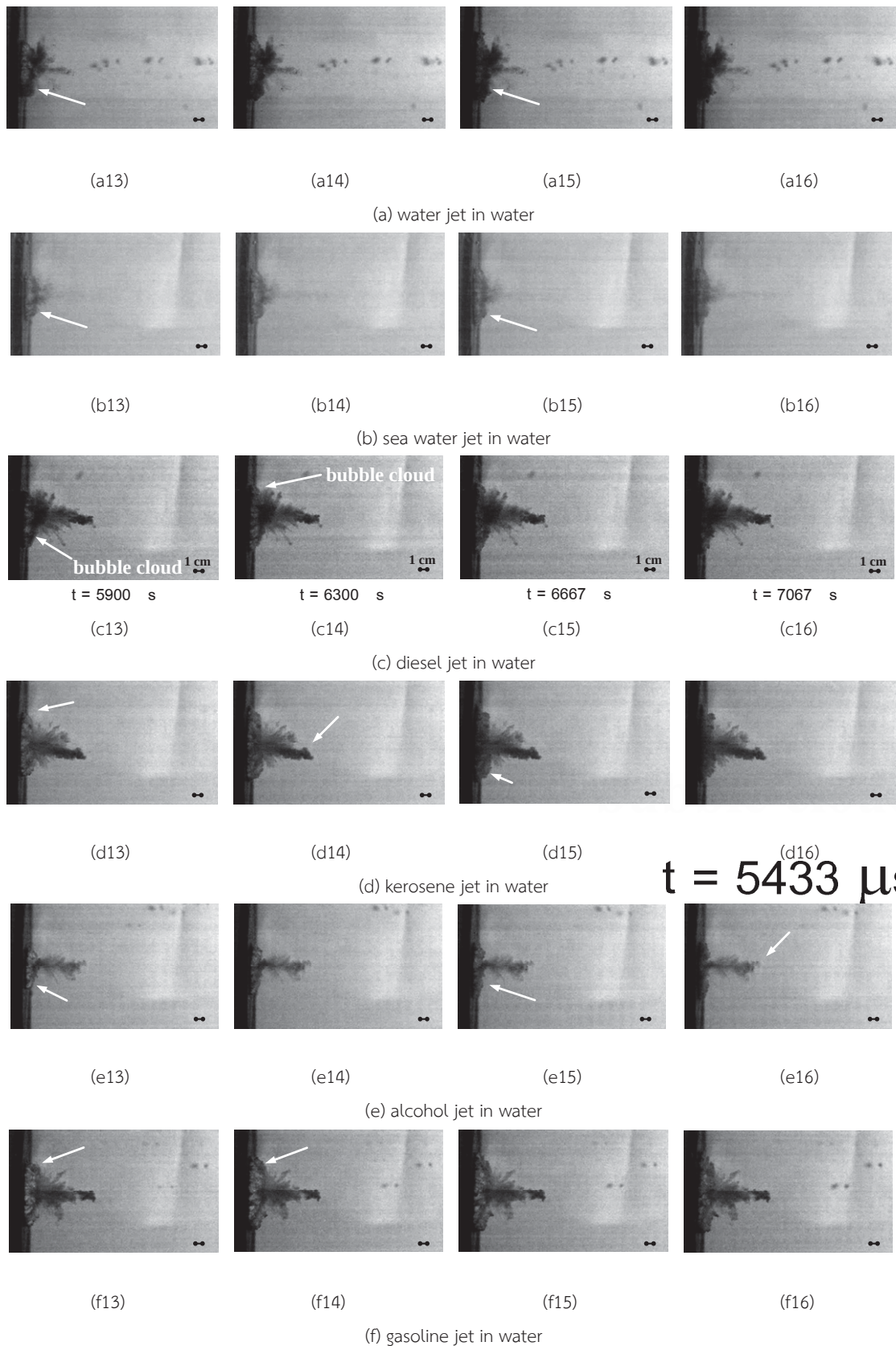


รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



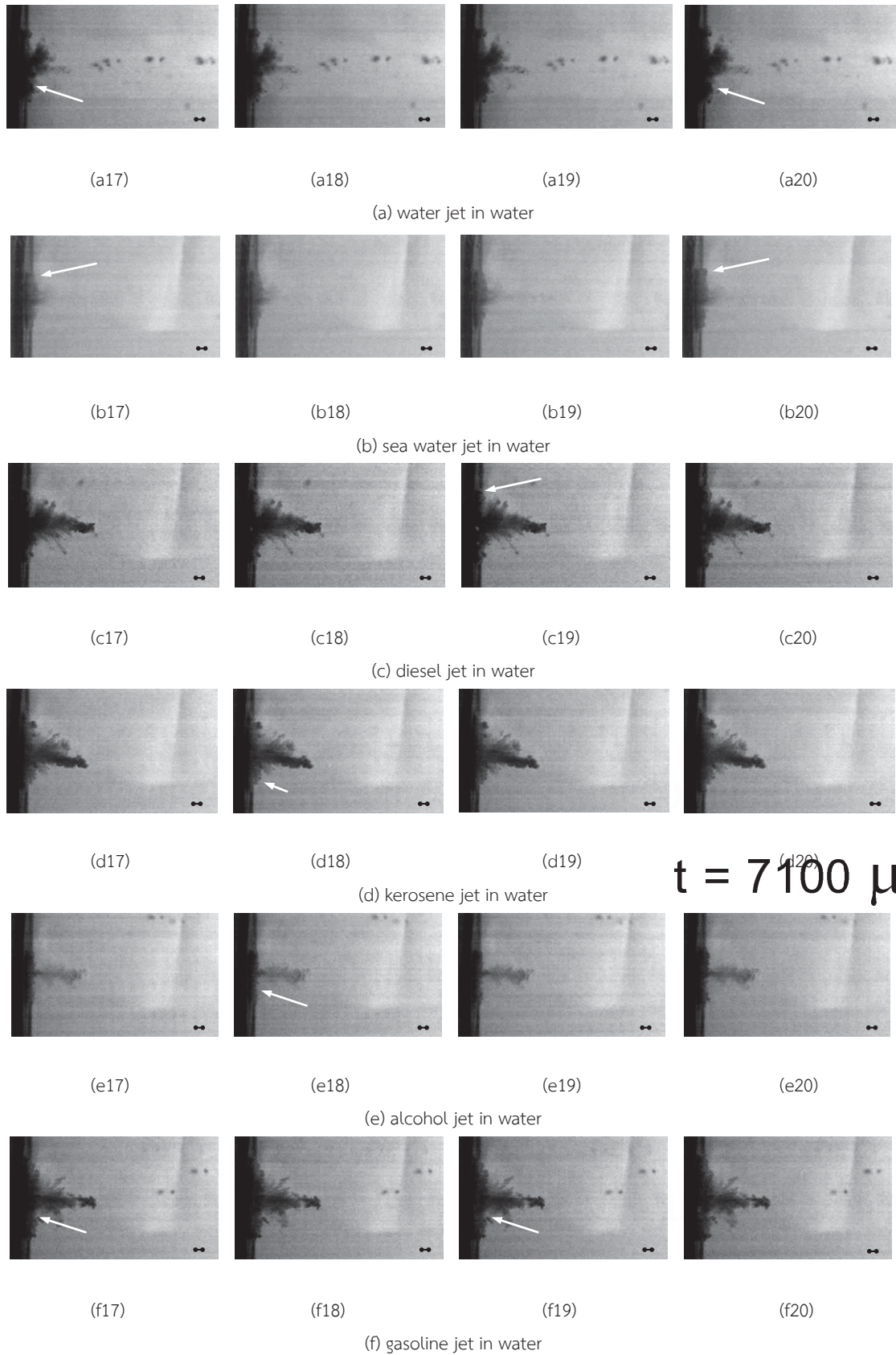
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโดยไม่ใช่เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)

$$t = 3733 \mu s$$



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโดยไม่ใช่เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)

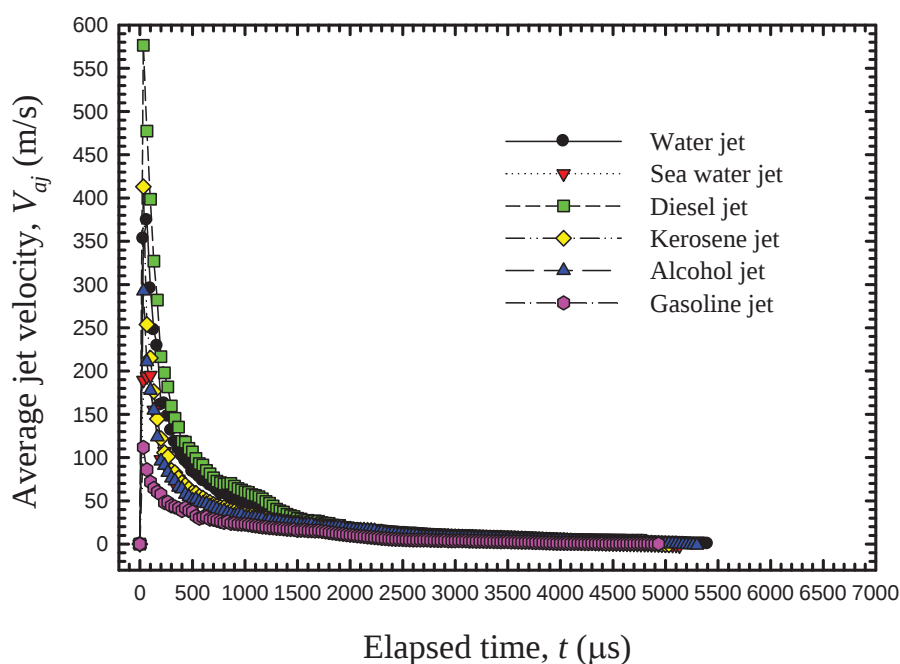
t = 5100 μ s



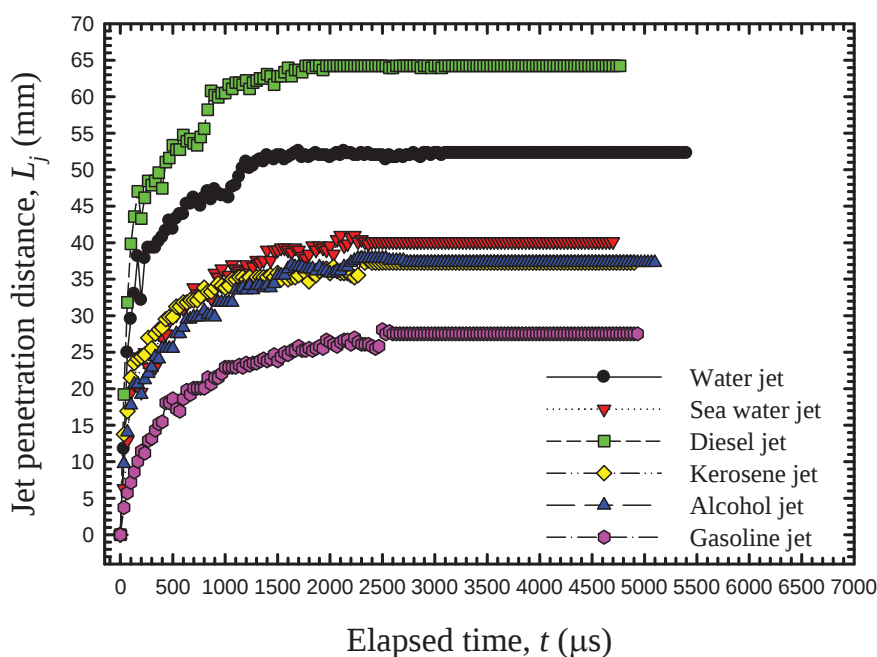
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโดยไม่ใช่เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)

จากรูปที่ 4.17 แสดงภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิค shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิดเมื่อฉีดในน้ำ ถึงแม้ว่าเวลาที่เกิดขึ้นในแต่ละพฤติกรรมของลำพุ่งในรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 จะไม่เท่ากันก็ตาม แต่รูปที่ 4.17 มีประโยชน์ในการช่วยให้เห็นพฤติกรรมที่การขยายตัวและยุบตัวของ bubble ที่ไม่ชัดเจนจากภาพถ่ายแบบ Shadowgraph ทั้งนี้ภาพแต่ละภาพ เช่น รูปที่ 4.17(a1) ก็จะสามารถคล้อยกับรูปที่ 4.16(a1) เป็นเช่นนี้ทุก ๆ ภาพ

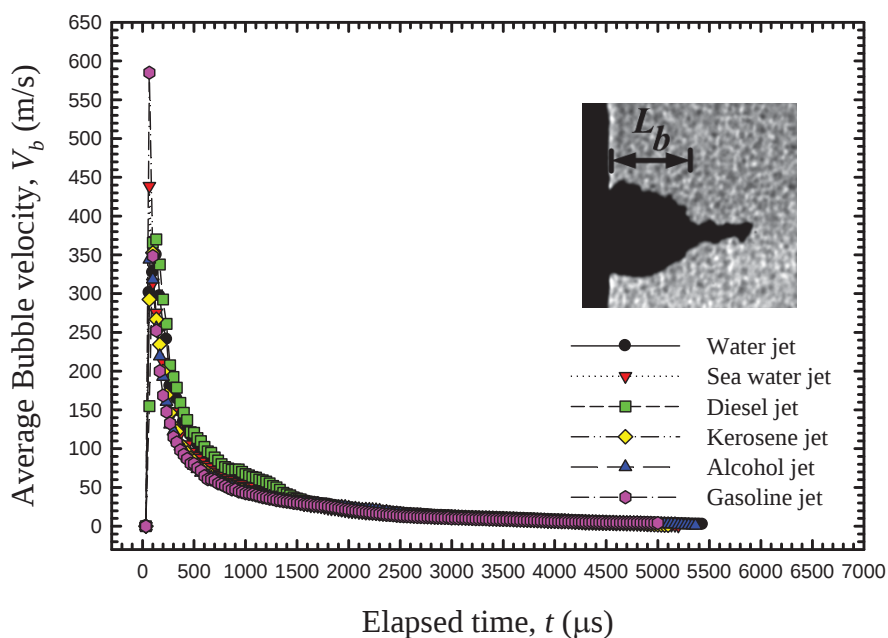
รูปที่ 4.18 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งในน้ำ (average jet velocity in water) ทั้ง 6 ชนิดพบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของลำพุ่งน้ำมันดีเซลมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำมันก๊าด, น้ำ, แอลกอฮอล์, น้ำทะเล และน้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ โดยมีความเร็วเท่ากับ 576.41 m/s, 412.95 m/s, 374.24 m/s, 292.51 m/s, 195.00 m/s และ 111.84 m/s ตามลำดับ โดยมีความเร็วสูงสุดที่เวลา 33 μ s จากนั้นความเร็วของลำพุ่งจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจาก hydrodynamic drag จากการพิจารณาคูณสมบัติทางกายภาพของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของลำพุ่งจะมีความสัมพันธ์กับความหนืดจลน์ (Kinematics viscosity) คือ เมื่อความหนืดจลน์สูงขึ้นความเร็วเฉลี่ยสูงสุดก็จะมีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่าลำพุ่งแอลกอฮอล์จะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว จึงส่งผลกับระยะการเคลื่อนที่ของลำพุ่งสูงสุดของ น้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, น้ำมันก๊าด, แอลกอฮอล์และน้ำมันแก๊สโซลีนตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับ 52.54 mm, 41.00 mm, 54.23 mm, 37.85 mm, 37.85mm และ 28.10 mm ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 ความเร็วเฉลี่ยของลำพุ่งในน้ำ (average jet velocity in water) ทั้ง 6 ชนิด



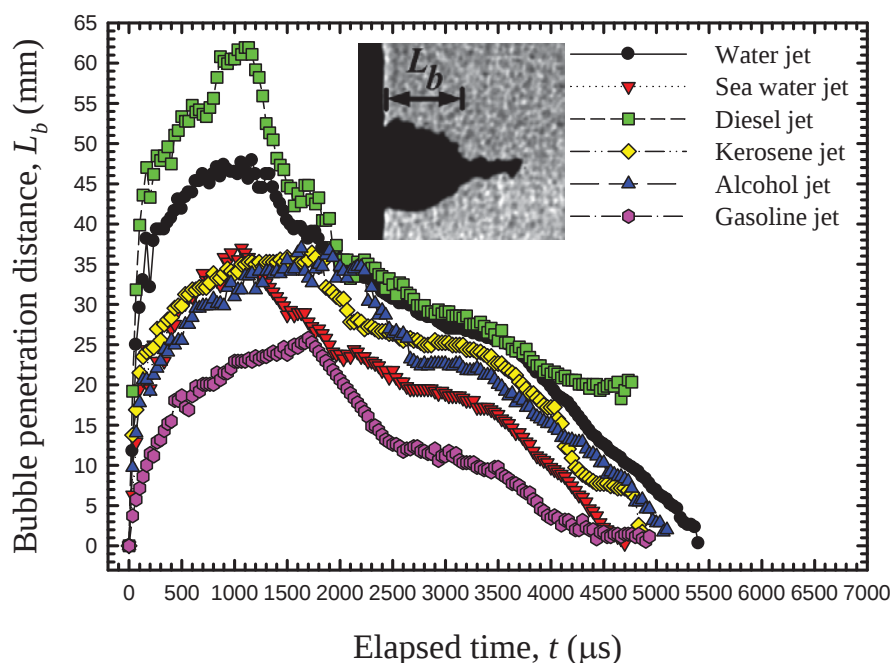
รูปที่ 4.19 ระยะการเคลื่อนที่ของลำพุงในน้ำ (jet penetration distance in water) ทั้ง 6 ชนิด



รูปที่ 4.20 ความเร็วเฉลี่ยของ bubble (average bubble velocity) ที่เกิดจากลำพุงทั้ง 6 ชนิด

จากรูปที่ 4.20 แสดงความเร็วเฉลี่ยของ bubble (average bubble velocity) ที่เกิดจากลำพุงทั้ง 6 ชนิด พบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของ bubble ที่เกิดจากลำพุงน้ำมันแก๊สโซลีนมีความเร็วสูง

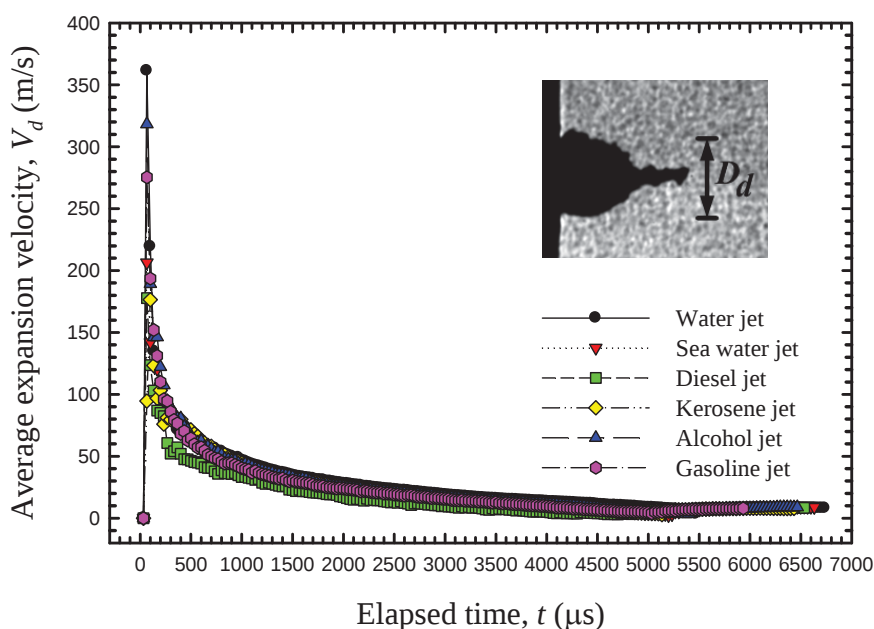
ที่สุด รองลงมาคือ น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, น้ำมันก๊าด, น้ำ และแอลกอฮอล์ ตามลำดับ โดยมีความเร็วอยู่ที่ 585.02 m/s, 438.76 m/s, 369.94 m/s, 352.73 m/s และ 344.13 m/s ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพู่ทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของลำพู่จะมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวสูงขึ้นความเร็วเฉลี่ยก็จะมีค่าต่ำลง ถึงแม้ว่าลำพู่ น้ำทะเลและแอลกอฮอล์จะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว จากนั้น bubble ก็จะถูกตัวลงเนื่องจากความดันภายใน bubble มีความดันต่ำลงและมีค่าต่ำกว่าความดันในห้องทดสอบ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพู่ทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ความเร็วในการขยายตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพู่จะมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อตึงผิวลดต่ำลงความเร็วเฉลี่ยในการขยายตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพู่จะมีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่า bubble ที่เกิดจากลำพู่ แอลกอฮอล์และน้ำทะเลจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว



รูปที่ 4.21 ระยะการเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration distance; L_b) ที่เกิดจากลำพู่ทั้ง 6 ชนิด

จากรูปที่ 4.21 แสดงระยะการเคลื่อนที่ของ bubble (bubble penetration distance; L_b) ที่เกิดจากลำพู่ทั้ง 6 ชนิด พบว่า bubble ที่เกิดจากของลำพู่ น้ำ, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซล, น้ำมันก๊าด, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน จะค่อยๆ เคลื่อนที่ไปข้างหน้า โดยระยะการเคลื่อนที่ของ bubble สูงสุดเกิดขึ้นที่เวลา 1,167 μs , 1,067 μs , 1,100 μs , 1,500 μs , 1,633 μs และ 1,700 μs ตามลำดับ ซึ่งระยะการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 47.88 mm, 36.99 mm, 61.93 mm, 35.48 mm, 36.99 mm

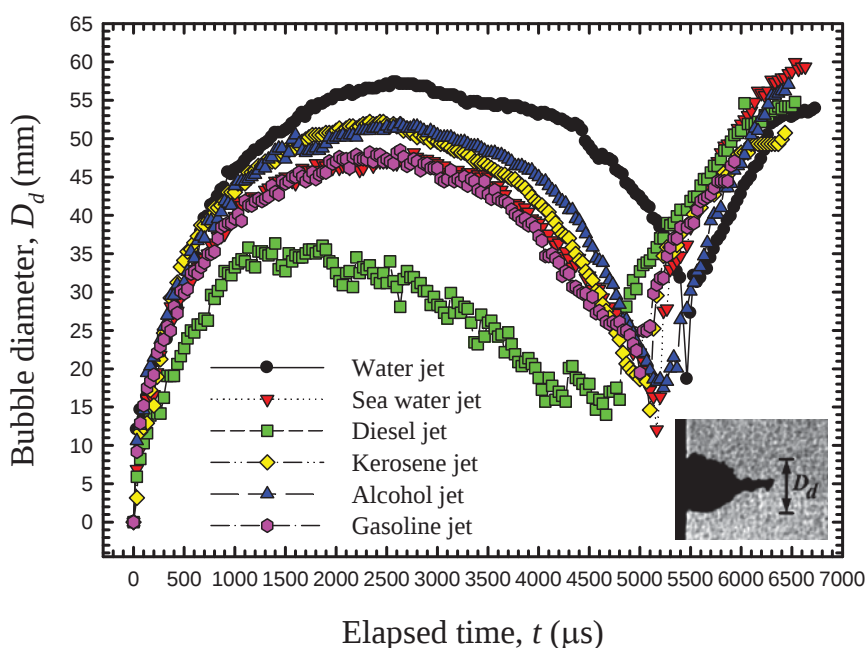
และ 25.80 mm ตามลำดับ หลังจากนั้น bubble จะค่อยๆ ยุบตัวลงจนถึงระยะต่ำสุด โดยพบว่า ระยะการเคลื่อนที่ของ bubble ที่เกิดจากลำพุน้ำมันดีเซลเคลื่อนที่ได้ไกลสุด รองลงมาคือ น้ำ, น้ำทะเลกับแอลกอฮอล์มีค่าเท่ากัน, น้ำมันก๊าด และน้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพุงทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ระยะการเคลื่อนที่ของ bubble ที่เกิดจากลำพุงจะมีความสัมพันธ์กับความหนืดจลน์ (Kinematics viscosity) คือ เมื่อความหนืดจลน์สูงขึ้นระยะทางในการเคลื่อนที่ไกลขึ้น ถึงแม้ว่าลำพุน้ำมันก๊าดจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์ แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งจะพบว่า ถึงแม้ว่าความเร็วในการขยายตัวเร็วก็ไม่แสดงว่ามีระยะทางในการเคลื่อนที่ไกลที่สุดเสมอไปดังรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.22 ความเร็วเฉลี่ยในการขยายตัวของ bubble (average expansion velocity of bubble) ของลำพุงทั้ง 6 ชนิด

จากรูปที่ 4.22 แสดงความเร็วเฉลี่ยในการขยายตัวของ bubble (average expansion velocity of bubble) ของลำพุงทั้ง 6 ชนิด พบว่า bubble ที่เกิดจากลำพุน้ำมันมีความเร็วสูงที่สุดในการขยายตัวเร็วที่สุด โดยจะเกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ 33 μs รองลงมาคือ แอลกอฮอล์, น้ำมันแก๊สโซลีน, น้ำทะเล, น้ำมันดีเซลและน้ำมันก๊าด ตามลำดับ โดยมีความเร็วเท่ากับ 361.33 m/s, 318.32 m/s, 275.30 m/s, 206.47 m/s, 177.76 m/s และ 176.36 m/s ตามลำดับ และมีความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ที่เกิดจากลำพุน้ำมันก๊าดสูงที่สุด รองลงมา คือ ลำพุน้ำ, แอลกอฮอล์, น้ำมันดีเซล, น้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำทะเล โดยมีค่าเท่ากับ 22.36 m/s, 22.05 m/s, 19.71 m/s,

19.31 m/s, 18.40 m/s และ 17.40 m/s ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำฟุ้งทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของลำฟุ้งจะมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวสูงขึ้นความเร็วเฉลี่ยก็จะมีค่าต่ำลง ถึงแม้ว่าลำฟุ้งน้ำและน้ำมันแก๊สโซลีนจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว ในขณะที่ความเร็วเฉลี่ยในการยุบตัวของ bubble ที่เกิดจากลำฟุ้งน้ำทะเลมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำมันก๊าด, น้ำ, แอลกอฮอล์, น้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำมันดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 15.05 m/s, 13.57 m/s, 13.50 m/s, 13.23 m/s, 12.23 m/s และ 6.84 m/s ตามลำดับ

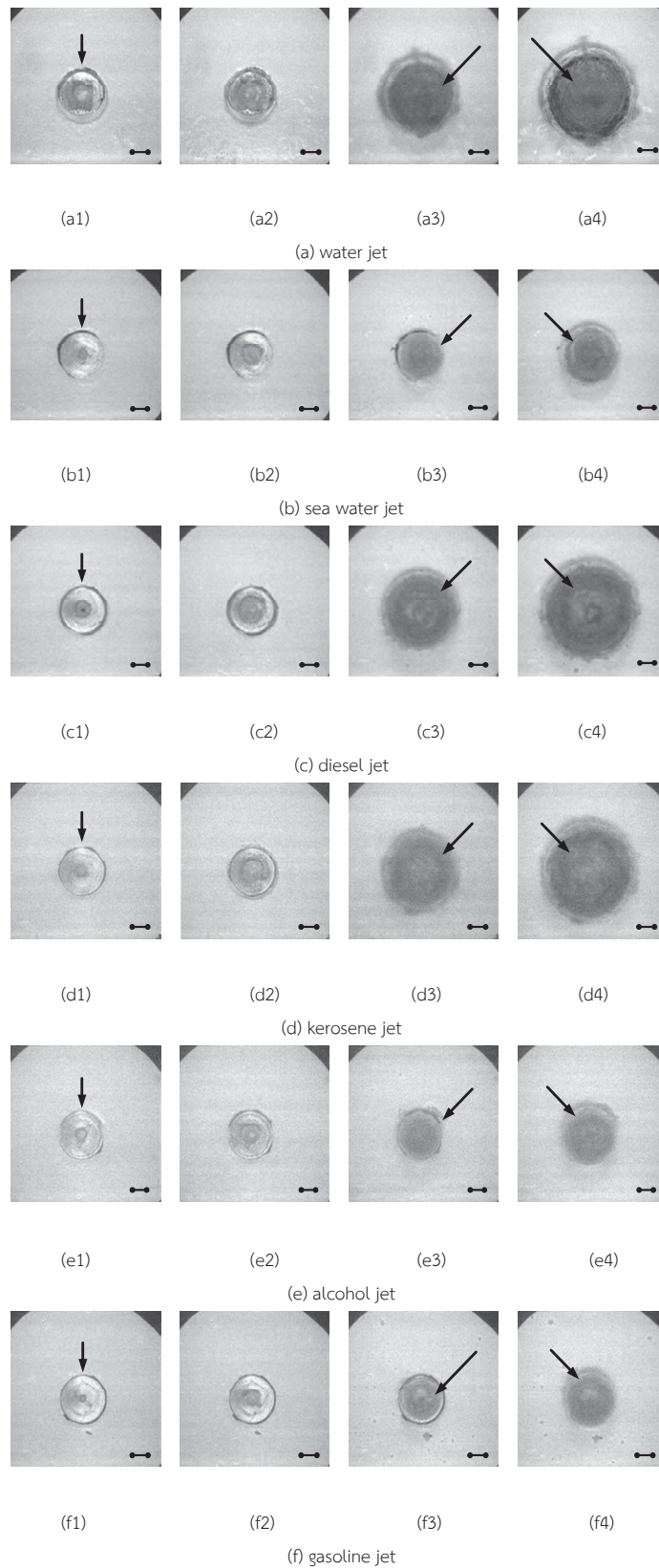


รูปที่ 4.23 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter; D_d) ของลำฟุ้งทั้ง 6 ชนิด

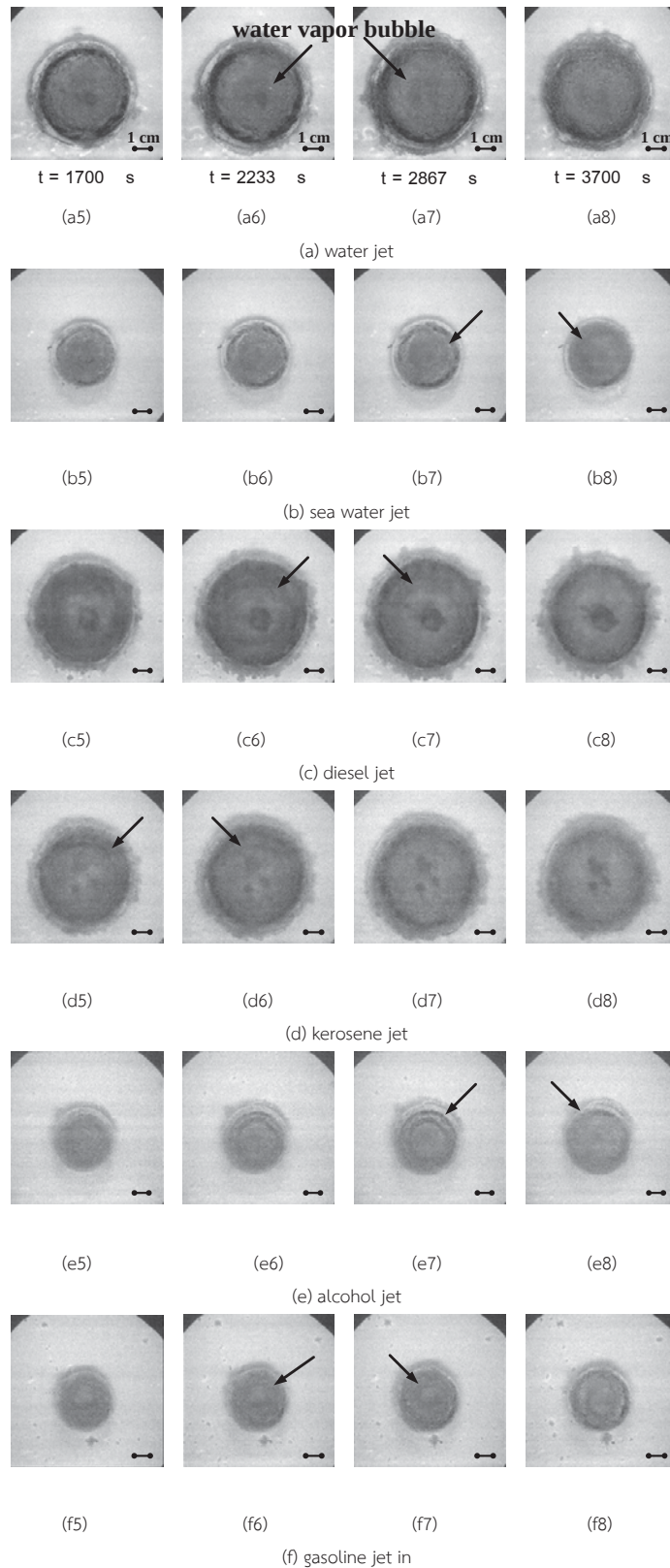
จากรูปที่ 4.23 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble (bubble diameter; D_d) ของลำฟุ้งทั้ง 6 ชนิด พบว่า เส้นผ่าศูนย์กลาง bubble ที่กว้างที่สุดเกิดจากลำฟุ้งน้ำ รองลงมาคือ น้ำมันก๊าด, แอลกอฮอล์, น้ำมันแก๊สโซลีน, น้ำทะเล และน้ำมันดีเซลจะขยายตัวสูงสุดที่เวลา 2,567 μ s, 2,333 μ s, 2,633 μ s, 2,633 μ s, 2,600 μ s และ 1,867 μ s ตามลำดับ โดยมีขนาดใหญ่มากที่สุดเท่ากับ 57.34 mm, 52.18 mm, 51.90 mm, 48.17 mm, 48.46 mm และ 36.32 mm ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำฟุ้งทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวสูงขึ้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ก็จะมีค่าต่ำลง ถึงแม้ว่าลำฟุ้งน้ำจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว จากนั้น bubble จะยุบตัวลงและจะเริ่มขยายตัวอีกครั้งที่เวลา 5,500 μ s, 5,167 μ s, 4,667 μ s, 5,100 μ s, 5,233 μ s และ 5,000 μ s ตามลำดับ โดย

พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble ของลำพุงน้ำมีขนาดใหญ่ที่สุด รองลงมาคือ น้ำมันก๊าด, แอลกอฮอล์, น้ำมันแก๊สโซลีน, น้ำทะเลและน้ำมันดีเซล ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพุงทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble ที่เกิดจากลำพุงมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อตึงผิวลดต่ำลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble ที่เกิดจากลำพุงจะมีขนาดต่ำลง ถึงแม้ว่า bubble ที่เกิดจากลำพุงดีเซลและน้ำทะเลจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว

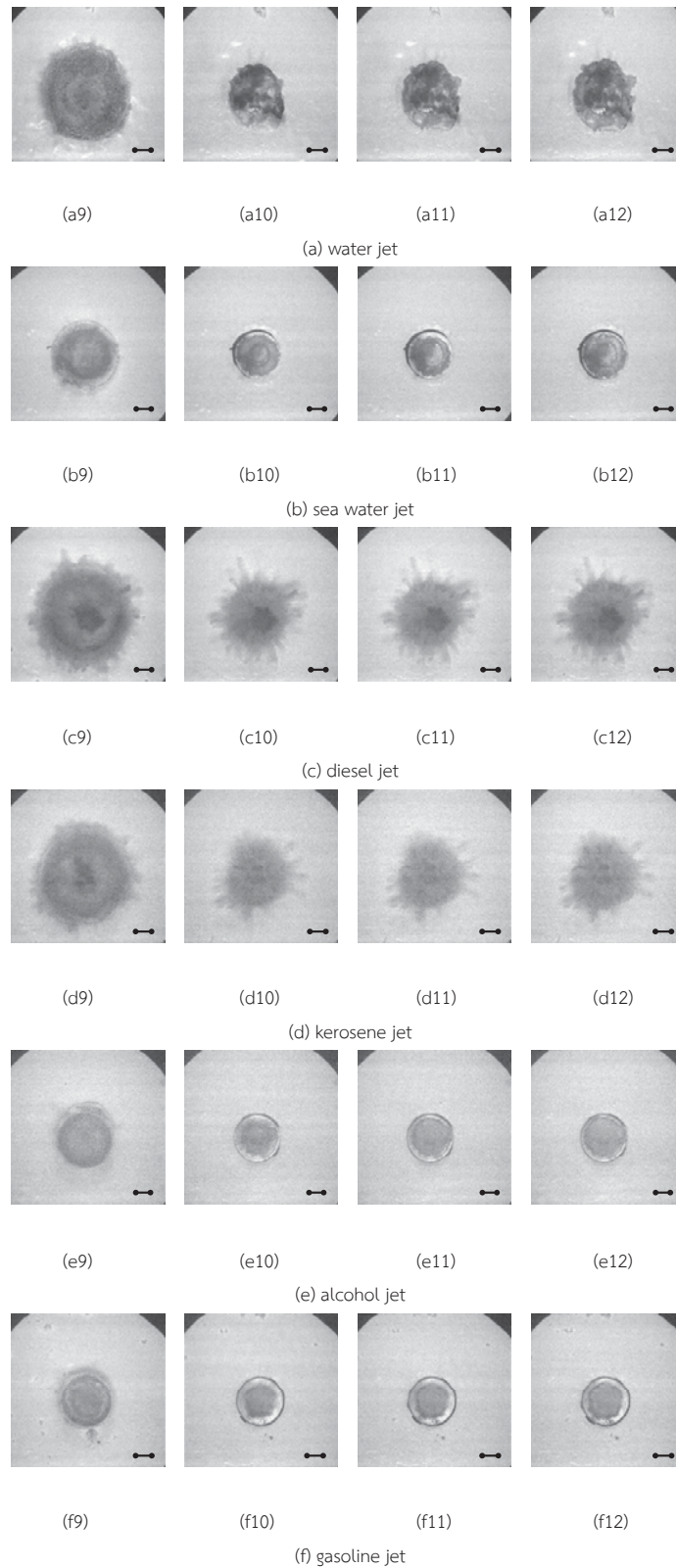
นอกจากการอธิบายคุณลักษณะของลำพุงที่เกิดขึ้นจากการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองปกติโดยใช้และไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph ดังที่กล่าวมาแล้ว ยังทำการถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพ Shadowgraph เพื่อช่วยอธิบายคุณลักษณะของลำพุงความเร็วสูงเมื่อฉีดในน้ำจากของเหลวทั้ง 6 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.24 จากภาพพบว่า ที่เวลาเท่ากับ 33-67 μs (รูปที่ 4.24(a1-f1) และ 4.24(a2-f2)) bubble ซึ่งเกิดจากของลำพุงทั้ง 6 ชนิดจะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ เป็นลักษณะกลมเกือบสมมาตร และเมื่อพิจารณาที่รูปที่ 4.24(a3-f3) และ 4.24(a4-f4) จะสังเกตเห็น bubble ที่เป็นลักษณะกลมอย่างชัดเจน โดยที่ bubble ที่เกิดจากลำพุงแต่ละชนิดจะมีขนาดแตกต่างกัน ซึ่ง bubble ที่เกิดจากลำพุงน้ำ น้ำมันดีเซล และน้ำมันก๊าดจะมีขนาดใหญ่เท่าๆ กัน ขณะที่ bubble ที่เกิดจากลำพุงน้ำทะเล แอลกอฮอล์และน้ำมันแก๊สโซลีนจะมีขนาดเล็กพอๆ กัน จากนั้น bubble ก็ขยายตัวขึ้น ดังรูปที่ 4.24(a5-f5) - 4.24(a6-f6) โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble กว้างที่สุดดังรูปที่ 4.24(a7-f7) ซึ่งพบว่า ลำพุงแอลกอฮอล์กับใช้เวลาในการขยายตัวน้อยที่สุดคือที่เวลา 1667 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในแนวตั้งเร็วที่สุดถึงแม้ว่าขนาดของ bubble จะเล็กกว่า bubble ที่เกิดจากลำพุงชนิดอื่นก็ตาม ในขณะที่ลำพุงน้ำมันดีเซลกลับใช้เวลามากที่สุดคือ 2867 μs หรือมีความเร็วในการขยายตัวในช้าที่สุด จากนั้น bubble ของลำพุงทั้ง 6 ชนิดก็จะยุบตัวลงดังรูปที่ 4.24(a8-f8) - 4.24(a11-f11) โดยจะยุบตัวให้มีขนาดต่ำสุดในรูปที่ 4.24(a12-f12) ของลำพุงทั้ง 6 ชนิด โดยลำพุงแก๊สโซลีนมีขนาดของ bubble เล็กที่สุดก่อน bubble ของลำพุงชนิดอื่นคือเกิดขึ้นที่เวลา 3767 μs หรือความเร็วในการยุบตัวเร็วที่สุด ในขณะที่ bubble ของลำพุงดีเซลเกิดขึ้นช้าที่สุดคือที่เวลา 6133 μs หรือความเร็วในการยุบตัวช้าที่สุด หลังจากเส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble ลดขนาดถึงจุดต่ำสุด bubble จะแตกตัวเป็นกลุ่ม bubble (bubble cloud) ดังรูปที่ 4.24(a13-f13) - 4.24(a16-f16) และจะขยายตัวอย่างรวดเร็วเป็นลักษณะรูปวงแหวนรอบๆ หัวฉีด โดย bubble มีการยุบตัวอย่างช้าๆ ก่อนที่จะหายไปดังรูปที่ 4.24(a17-f17) - 4.24(a20-f20)



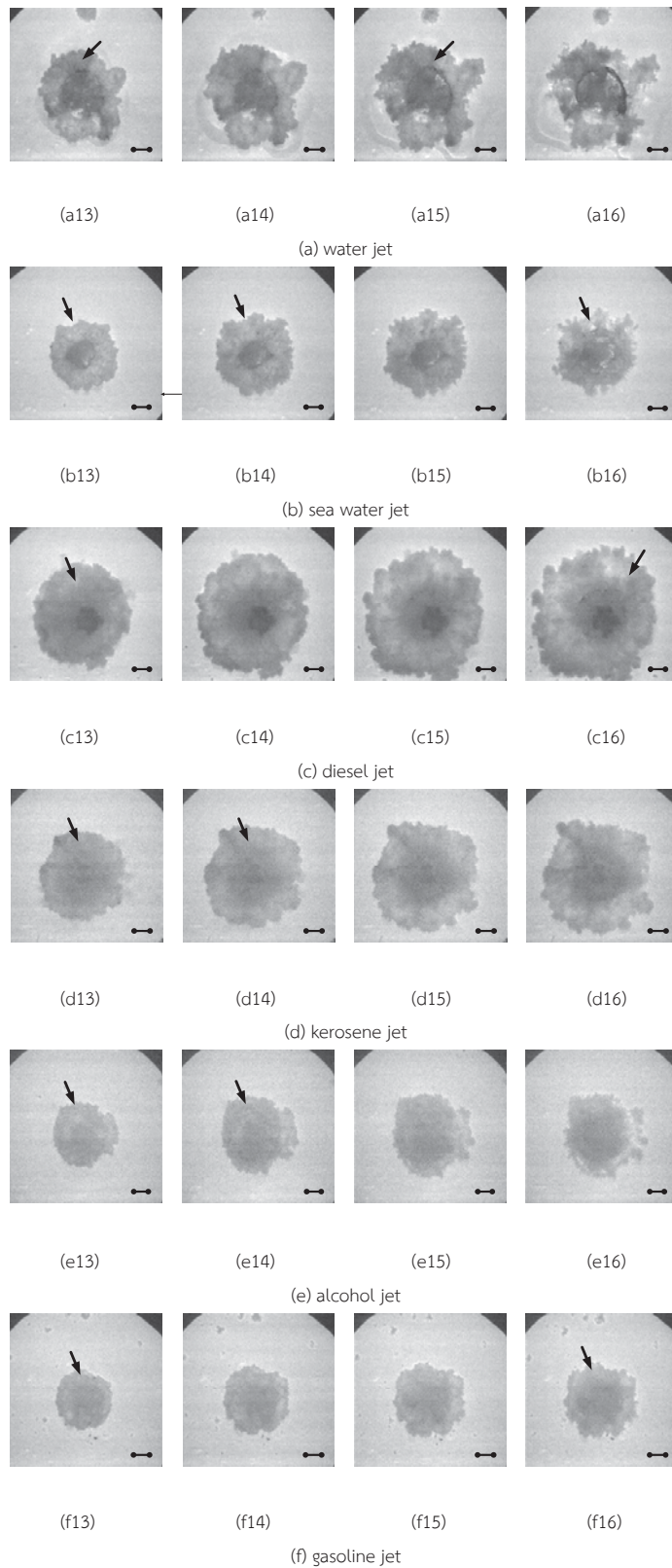
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด
เมื่อฉีดในน้ำ



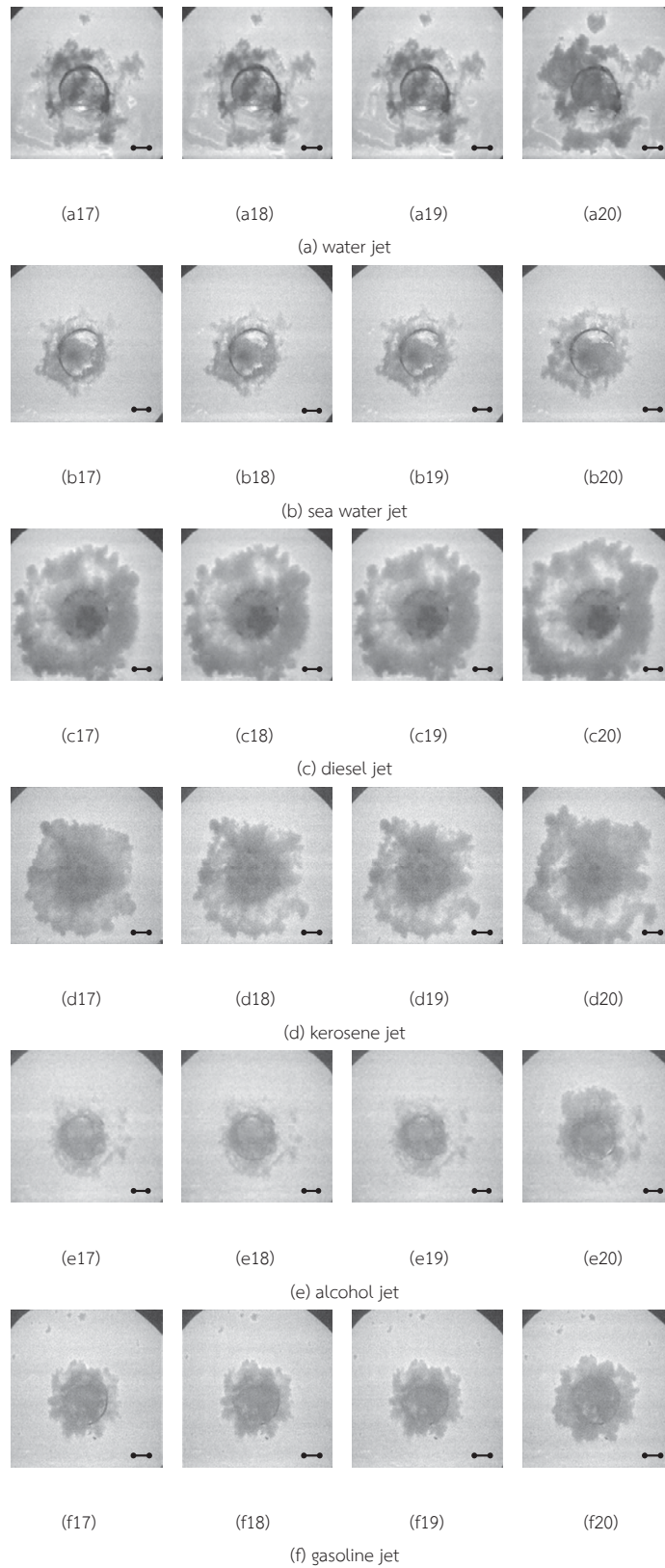
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด
เมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



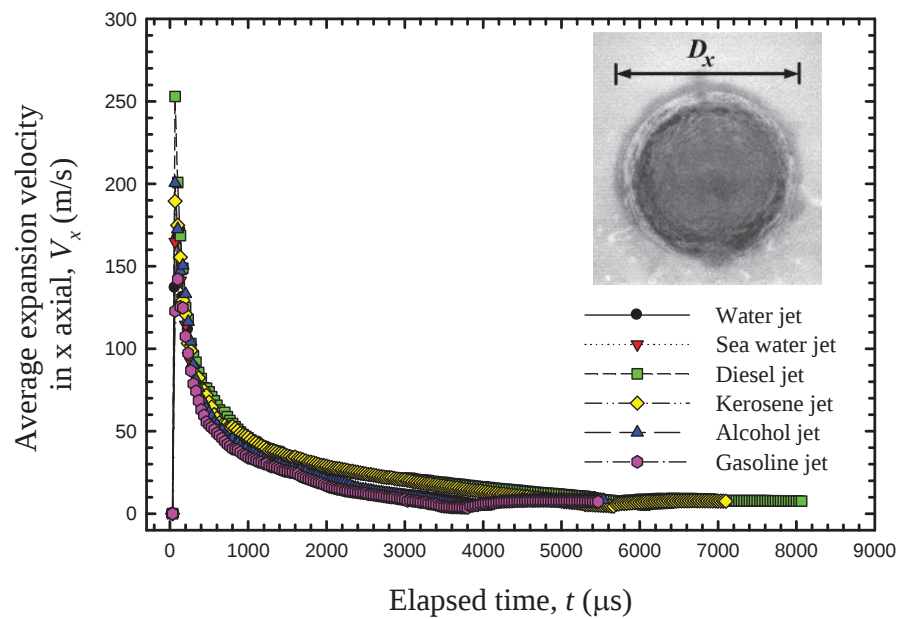
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด
เมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



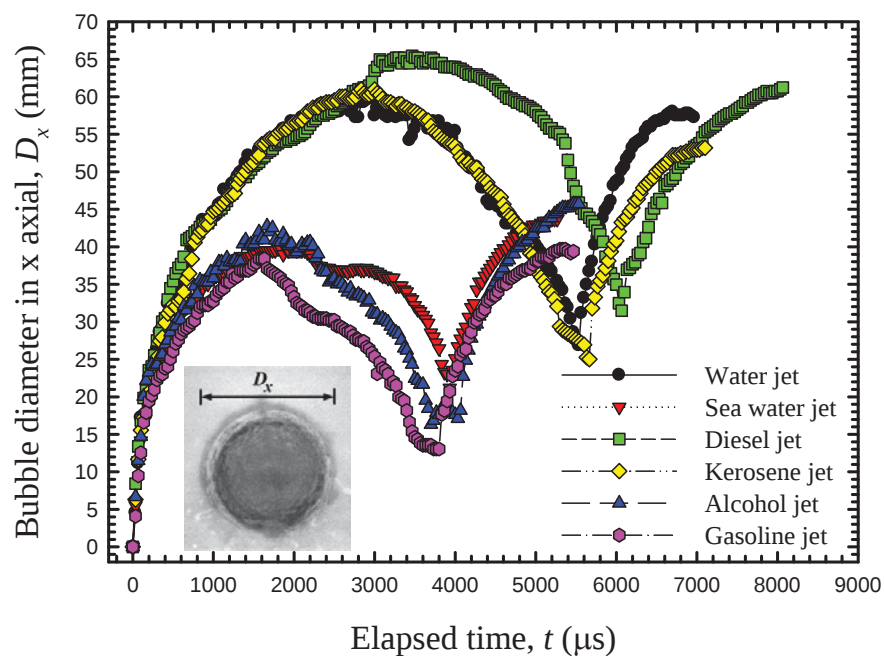
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด
เมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ของลำพุ่งความเร็วสูงทั้ง 6 ชนิด เมื่อฉีดในน้ำ (ต่อ)



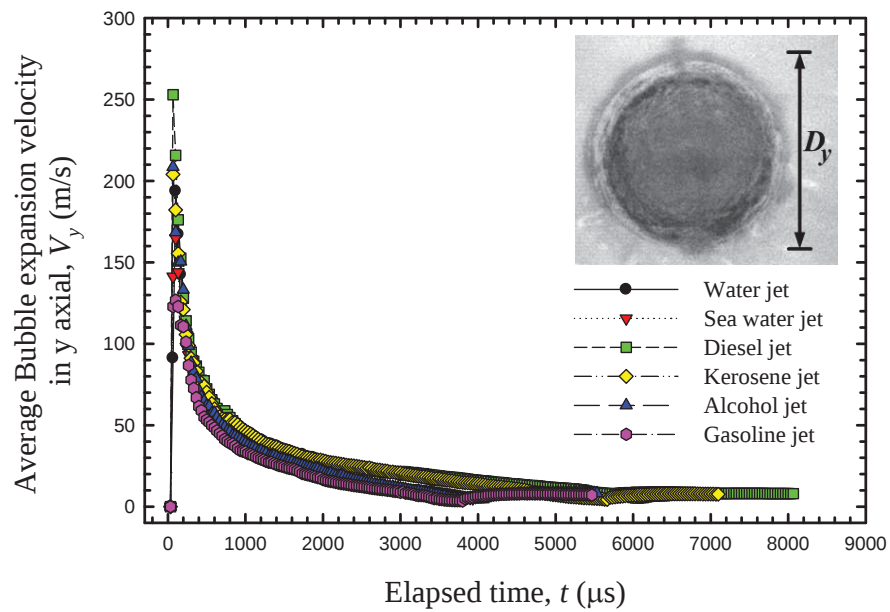
รูปที่ 4.25 ความเร็วในการขยายตัวของ bubble ในแนวนอน (average expansion velocity of bubble in x axial; V_x) ของลำพ่นทั้ง 6 ชนิด



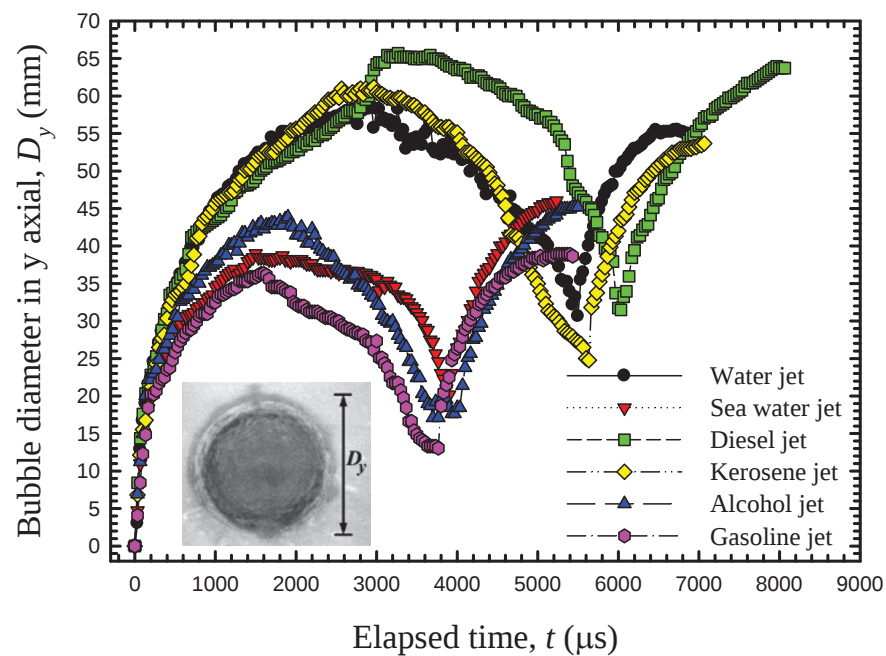
รูปที่ 4.26 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (bubble diameter in x axial; D_x) ของลำพ่นทั้ง 6 ชนิด

รูปที่ 4.25 แสดงความเร็วการขยายตัวของ bubble ในแนวนอน (average expansion velocity of bubble in x axial; V_x) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด จากรูปพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันดีเซลมีความเร็วในการขยายตัวสูงสุด โดยจะเกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ 33 μs รองลงมาคือ แอลกอฮอล์, น้ำทะเล, น้ำ, น้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำมันก๊าด ตามลำดับ โดยมีความเร็วเท่ากับ 252.88 m/s, 200.58 m/s, 172.63 m/s, 172.18 m/s, 142.04 m/s และ 89.44 m/s ตามลำดับ และมีความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันแอลกอฮอล์สูงที่สุด รองลงมา คือ น้ำมันแก๊สโซลีน น้ำทะเล น้ำ น้ำมันก๊าดและน้ำมันดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 26.29 m/s, 25.91 m/s, 22.49 m/s, 20.60 m/s, 20.54 m/s และ 20.16 m/s ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวลดต่ำลงความเร็วในการขยายตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งจะมีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันดีเซลและน้ำมันก๊าดจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว ในขณะที่ความเร็วเฉลี่ยในการยุบตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันก๊าดมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำ, น้ำมันดีเซล, น้ำมันแก๊สโซลีน, แอลกอฮอล์ และน้ำทะเล โดยมีค่าเท่ากับ 13.48 m/s, 12.66 m/s, 12.03 m/s, 11.38 m/s, 10.69 m/s และ 8.70 m/s ตามลำดับ ด้วยเหตุผลเดียวกันกับความเร็วในการขยายตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

รูปที่ 4.26 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (bubble diameter in x axial; D_x) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด จากรูปพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble กว้างที่สุดเกิดจากลำพุ่งน้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด, น้ำ, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน ที่เวลา 3,233 μs , 2,967 μs , 2,900 μs , 1,633 μs , 1,767 μs และ 1,500 μs ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (D_x) เท่ากับ 65.19 mm, 60.95 mm, 59.75 mm, 42.78 mm, 39.75 mm และ 38.87 mm ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวลดต่ำลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งจะมีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำและน้ำมันแก๊สโซลีนจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว จากนั้น bubble จะค่อยๆ ยุบตัวลง ซึ่งการยุบตัวของ bubble จนถึงขนาดต่ำสุดที่เวลา 6,000 μs , 5,467 μs , 5,600 μs , 3,867 μs , 4,000 μs และ 3,733 μs สำหรับ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันดีเซล น้ำ, น้ำมันก๊าด, น้ำทะเล, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำสุดเท่ากับ 31.48 mm, 26.83 mm, 25.01 mm, 21.18 mm, 13.11 mm และ 13.05 mm ตามลำดับ จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวขึ้นอีกครั้ง



รูปที่ 4.27 ความเร็วในการขยายตัวของ bubble ในแนวตั้ง (average expansion velocity of bubble in y axial D_y) ของลำพ่นทั้ง 6 ชนิด



รูปที่ 4.28 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวตั้ง (bubble diameter in y axial; D_y) ของลำพ่นทั้ง 6 ชนิด

รูปที่ 4.27 แสดงความเร็วในการขยายตัวของ bubble ในแนวตั้ง (average expansion velocity of bubble in y axial D_y) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด จากรูปพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันดีเซลมีความเร็วในการขยายตัวสูงสุด โดยจะเกิดขึ้นที่เวลาเท่ากับ 33 μs รองลงมาคือ แอลกอฮอล์, น้ำมันก๊าด, น้ำ, น้ำทะเล และน้ำมันแก๊สโซลีน ตามลำดับ โดยมีความเร็วเท่ากับ 252.88 m/s, 208.60 m/s, 204.02 m/s, 193.71 m/s, 164.78 m/s และ 126.69 m/s ตามลำดับ และมีความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันแอลกอฮอล์สูงที่สุด รองลงมา คือ น้ำมันแก๊สโซลีน, น้ำทะเล, น้ำ, น้ำมันก๊าด และน้ำมันดีเซล โดยมีค่าเท่ากับ 23.34 m/s, 23.18 m/s, 21.50 m/s, 20.48 m/s, 20.62 m/s และ 20.10 m/s ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ความเร็วในการขยายตัวเฉลี่ยของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวลดต่ำลงความเร็วในการขยายตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งจะมีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันดีเซลและน้ำมันก๊าดจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าว ในขณะที่ความเร็วเฉลี่ยในการยุบตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันก๊าดมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาคือ น้ำมันดีเซล แอลกอฮอล์ น้ำ น้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำทะเล โดยมีค่าเท่ากับ 13.66 m/s, 12.36 m/s, 11.60 m/s, 10.67 m/s, 10.58 m/s และ 8.75 m/s ตามลำดับ ด้วยเหตุผลเดียวกันกับความเร็วในการขยายตัวของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่ง ดังได้กล่าวมาแล้ว

รูปที่ 4.28 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวตั้ง (bubble diameter in y axial; D_y) ของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิด จากรูปพบว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble กว้างที่สุดเกิดจากลำพุ่งน้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด, น้ำ, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน ที่เวลา 3,261 μs , 2,967 μs , 2,867 μs , 1,867 μs , 1,800 μs และ 1,567 μs ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ในแนวนอน (D_x) เท่ากับ 65.69 mm, 61.20 mm, 58.74 mm, 43.58 mm, 38.70 mm และ 36.33 mm ตามลำดับ จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดจากตารางที่ 4.1 พบว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งมีความสัมพันธ์กับความตึงผิว (surface tension) คือ เมื่อความตึงผิวลดต่ำลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งจะมีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันน้ำและน้ำมันแก๊สโซลีนจะให้ผลที่ไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แต่ก็มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ดังกล่าวจากนั้น bubble จะค่อยๆ ยุบตัวลง ซึ่งการยุบตัวของ bubble จนถึงขนาดต่ำสุดที่เวลา 6,000 μs , 5,467 μs , 5,600 μs , 3,867 μs , 4,000 μs และ 3,733 μs สำหรับ bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำมันดีเซล น้ำ, น้ำมันก๊าด, น้ำทะเล, แอลกอฮอล์ และน้ำมันแก๊สโซลีน โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำสุดเท่ากับ 31.48 mm, 30.63 mm, 24.77 mm, 20.13 mm, 18.45 mm และ 13.05 mm ตามลำดับ จากนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของ bubble จะขยายตัวขึ้นอีกครั้ง โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองของลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำ

Liquid 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_{de} (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)
Water	374.24	52.54 @ 1,700 μ s	47.88 at t = 1,167 μ s	41.02	11.03	57.34 at t = 2,600 μ s	22.05	13.50	59.75 at t = 2,900 μ s	58.74 at t = 2,867 μ s	20.60	12.66	20.48	10.67
Sea water	195.00	41.00 at t = 2,100 μ s	36.99 at t = 1,067 μ s	34.66	10.10	48.17 at t = 2,767 μ s	17.40	15.05	39.75 at t = 1,767 μ s	38.70 at t = 1,800 μ s	22.49	8.70	21.50	8.75
Diesel	576.41	54.23 at t = 1,767 μ s	61.93 at t = 1,100 μ s	56.30	11.34	36.06 at t = 1,867 μ s	19.31	6.84	65.19 at t = 3,233 μ s	65.69 at t = 3,261 μ s	20.16	12.03	20.10	12.36

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดลองคุณลักษณะลำพุ่งความเร็วสูงใ้ในน้ำ (ต่อ)

Liquid 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)
Kerosene	412.95	37.85 at t = 2,300 μs	35.84 at t = 1,500 μs	23.89	10.28	52.18 at t = 2,333 μs	22.36	13.57	60.95 at t = 2,967 μs	61.20 at t = 2,967 μs	20.54	13.48	20.62	13.66
Alcohol	292.51	37.85 at t = 2,267 μs	39.99 at t = 1,633 μs	24.48	10.95	51.90 at t = 2,633 μs	19.71	13.23	42.78 at t = 1,633 μs	43.58 at t = 1,867 μs	26.19	10.69	23.34	11.60
Gasoline	111.84	28.10 at t = 2,500 μs	25.80 at t = 1,700 μs	15.17	7.62	48.46 at t = 2,633 μs	18.40	12.23	38.87 at t = 1,500 μs	36.33 at t = 1,567 μs	25.91	11.38	23.18	10.58

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)

4.8 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงของน้ำ (water), น้ำทะเล (sea water), น้ำมันดีเซล (diesel), น้ำมันก๊าด (kerosene), แอลกอฮอล์ (alcohol) และน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline) ที่ฉีดในอากาศและ condensed media (น้ำ) ด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph และไม่ใช่เทคนิค Shadowgraph รวมถึงการถ่ายภาพในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph พบว่า

1. จากภาพถ่าย Shadowgraph ของลำพุ่งน้ำในอากาศ แสดงให้เห็นการเกิด Shock wave ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของลำพุ่งด้วยความเร็วสูงอย่างชัดเจน โดยลำพุ่งน้ำมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1,699 m/s ($Ma = 4.9$) และยังพบการเกิด second shock wave และ change in shock angle ซึ่งเกิดจาก second jet นอกจากนี้ยังพบกลไกการแตกตัว (break up) การแตกเป็นฝอยละออง (atomization) และการระเหยกลายเป็นไอ (vaporization) อย่างชัดเจน

2. จากภาพถ่าย Shadowgraph ของลำพุ่งน้ำในน้ำ แสดงให้เห็นการเกิด bubble ที่เกิดจากลำพุ่งน้ำในน้ำ รวมไปถึงกลไกการขยายตัวและยุบตัวของ bubble ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปรากฏการณ์ของ cavitations นอกจากนี้ยังสังเกตเห็น shock wave, compressed wave, rebound shock wave จากการยุบตัวของ bubble ในน้ำ และจากภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph และการถ่ายภาพในแนวแกนช่วยให้สังเกตและเข้าใจพฤติกรรมต่างๆ ของ bubble ได้อย่างชัดเจน

3. จากภาพถ่ายของลำพุ่งชนิดต่างๆ ในอากาศ พบว่า ลำพุ่งน้ำและน้ำทะเลมีลักษณะเรียวยาวและมีขนาดแคบ โดยไม่แสดงให้เห็นถึงกลไกการแตกตัวเป็นฝอยละอองตลอดการทดลอง ในขณะที่ลำพุ่งน้ำมันดีเซลและแอลกอฮอล์จะมีขนาดใหญ่กว่ามีพื้นผิวที่ขรุขระกว่าแต่ก็ยังไม่แสดงให้เห็นถึงการแตกตัวเป็นฝอยละอองอย่างชัดเจน โดยการแตกตัวเป็นฝอยละอองที่รุนแรงเกิดขึ้นกับลำพุ่งน้ำมันก๊าดและน้ำมันแก๊สโซลีน ซึ่งเป็นผลมาจากความตึงผิว (surface tension) ของน้ำมันก๊าดและน้ำมันแก๊สโซลีนที่ต่ำที่สุด โดยการแตกตัวจะยิ่งรุนแรงเมื่อความตึงผิวของของเหลวต่ำลง จากการตรวจวัดความเร็วพบว่า ลำพุ่งน้ำมีความเร็วเฉลี่ยสูงสุดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุกชนิดโดยมีความเร็วเท่ากับ 1,669.03 m/s ($Ma = 4.9$) ในขณะที่ลำพุ่งน้ำมันก๊าดมีความเร็วเฉลี่ยสูงสุดต่ำสุดเมื่อเทียบกับทุกชนิดโดยมีความเร็วเท่ากับ 1,264 m/s ($Ma = 3.7$) เนื่องมาจากความตึงผิวของน้ำมันค่าสูงกว่าของน้ำมันก๊าด โดยความเร็วของลำพุ่งสูงขึ้นเมื่อค่าความตึงผิวของของเหลวสูงขึ้น

4. จากภาพถ่ายของลำพุ่งชนิดต่างๆ ในน้ำ พบว่า bubble ที่เกิดจากลำพุ่งทั้ง 6 ชนิดจะมีลักษณะเป็นทรงกลมคล้ายกัน แต่มีขนาดและความเร็วในการเกิดพฤติกรรมต่างๆ แตกต่างกันไปสรุปในตารางที่ 4.3 และจากการพิจารณาพบว่า ความหนืดจลน์ (Kinematics viscosity) และความตึงผิว (Surface tension) เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวที่สำคัญต่อคุณลักษณะของลำพุ่งความเร็วสูงในน้ำ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาคูณลักษณะของลำพุงของเหลวความเร็วสูงที่ฉีดในอากาศและใน condensed media (น้ำ) ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้การผลิตลำพุงด้วยเทคนิคที่เรียกว่า impact driven method จากชุดทดลอง Horizontal Single Stage Powder Gun (HSSPG) ซึ่งมีสมรรถนะในการผลิตความเร็วของกระสุนปืนได้สูงสุดที่ 1,294 m/s โดยใช้ดินปืนน้ำหนัก 7 g และมีความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของดินปืนกับความเร็วของกระสุนปืนในห้องทดสอบคือ $V_2 = 153.7m_g + 220.2$ โดยการศึกษาที่ใช้ความเร็วของกระสุนปืนในการผลิตลำพุงเท่ากับ 950 ± 30 m/s ที่ดินปืนหนัก 5 g ซึ่งลำพุงจะถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดที่มีลักษณะทรงกรวย (conical nozzle) มุม 30° ขนาดรูคอคอด (orifice) เท่ากับ 0.7 mm โดยคุณลักษณะของลำพุงที่เกิดขึ้นนั้นได้ถูกอธิบายจากการถ่ายภาพใน 3 ลักษณะคือ 1) การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High-speed digital video camera) ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Shadowgraph 2) การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงในมุมมองปกติโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph และ 3) การถ่ายภาพด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูงในแนวแกนโดยไม่ใช้เทคนิค Shadowgraph ซึ่งจากภาพถ่ายของลำพุงน้ำ (water), น้ำทะเล (sea water), น้ำมันดีเซล (diesel), น้ำมันก๊าด (kerosene), แอลกอฮอล์ (alcohol) และน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline) ที่ฉีดในอากาศและ condensed media (น้ำ) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากภาพถ่าย Shadowgraph ของลำพุงน้ำในอากาศ แสดงให้เห็นการเกิด Shock wave ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของลำพุงด้วยความเร็วสูงอย่างชัดเจน โดยลำพุงน้ำมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1,699 m/s ($Ma = 4.9$) และยังพบการเกิด second shock wave และ change in shock angle ซึ่งเกิดจาก second jet นอกจากนี้ยังพบกลไกการแตกตัว (break up) การแตกเป็นฝอยละเอียด (atomization) และการระเหยกลายเป็นไอ (vaporization) อย่างชัดเจน

2. จากภาพถ่าย Shadowgraph ของลำพุงน้ำในน้ำ แสดงให้เห็นการเกิด bubble ที่เกิดจากลำพุงน้ำในน้ำ รวมไปถึงกลไกการขยายตัวและยุบตัวของ bubble ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปรากฏการณ์ของ cavitations นอกจากนี้ยังสังเกตเห็น shock wave, compressed wave, rebound shock wave จากการยุบตัวของ bubble ในน้ำ และจากภาพถ่ายโดยไม่ใช้เทคนิคการถ่ายภาพแบบ Shadowgraph และการถ่ายภาพในแนวแกนช่วยให้สังเกตและเข้าใจพฤติกรรมต่างๆ ของ bubble ได้อย่างชัดเจน

3. จากภาพถ่ายของลำพุงชนิดต่างๆ ในอากาศ พบว่า ลำพุงน้ำและน้ำทะเลมีลักษณะเรียวยาวและมีขนาดแคบ โดยไม่แสดงให้เห็นถึงกลไกการแตกตัวเป็นฝอยละเอียดตลอดการทดลอง ในขณะที่ลำพุงน้ำมันดีเซลและแอลกอฮอล์จะมีขนาดที่ใหญ่กว่ามีพื้นผิวที่ขรุขระกว่าแต่ก็ยังไม่แสดงให้เห็น

เห็นถึงการแตกตัวเป็นฝอยละเอียดอย่างชัดเจน โดยการแตกตัวเป็นฝอยละเอียดที่รุนแรงเกิดขึ้นกับลำพุงน้ำมันก๊าดและน้ำมันแก๊สโซลีน ซึ่งเป็นผลมาจากความตึงผิว (surface tension) ของน้ำมันก๊าดและน้ำมันแก๊สโซลีนที่ต่ำที่สุด โดยการแตกตัวจะยิ่งรุนแรงเมื่อความตึงผิวของของเหลวต่ำลง จากการตรวจวัดความเร็วพบว่า ลำพุงน้ำมันมีความเร็วเฉลี่ยสูงสุดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุกชนิดโดยมีความเร็วเท่ากับ 1,669.03 m/s ($Ma = 4.9$) ในขณะที่ลำพุงน้ำมันก๊าดมีความเร็วเฉลี่ยสูงสุดต่ำสุดเมื่อเทียบกับทุกชนิดโดยมีความเร็วเท่ากับ 1,264 m/s ($Ma = 3.7$) เนื่องมาจากความตึงผิวของน้ำมันค่าสูงกว่าของน้ำมันก๊าด โดยความเร็วของลำพุงสูงขึ้นเมื่อค่าความตึงผิวของของเหลวสูงขึ้น

4. จากภาพถ่ายของลำพุงชนิดต่างๆ ในน้ำ พบว่า bubble ที่เกิดจากลำพุงทั้ง 6 ชนิดจะมีลักษณะเป็นทรงกลมคล้ายกัน แต่มีขนาดและความเร็วในการเกิดพฤติกรรมต่างๆ แตกต่างกันไปสรุปในตารางที่ 4.3 และจากการพิจารณาพบว่า ความหนืดจลน์ (Kinematics viscosity) และความตึงผิว (Surface tension) เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวที่สำคัญต่อคุณลักษณะของลำพุงความเร็วสูงในน้ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรผลิตกระสุนปืนให้ได้ขนาดและน้ำหนักที่เท่ากันทุกการทดลอง เนื่องจากจะมีผลกับความเร็วของกระสุนปืนและความเร็วของลำพุงที่ผลิตได้
2. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับชุดทดลองที่สามารถยิงกระสุนปืนได้อย่างต่อเนื่องและลดเวลาในการประกอบชุดทดลอง
3. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับความดันกระแทกของลำพุงกรณีฉีดในน้ำ เพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้จริงกับการเจาะหรือตัดโครงสร้างได้ทะเล
4. ควรมีการศึกษาคุณลักษณะของลำพุงชนิดอื่นๆ หรือของไหลชนิดอื่นเช่น Non-Newtonian fluid กรณีฉีดในอากาศและในน้ำ

เอกสารอ้างอิง

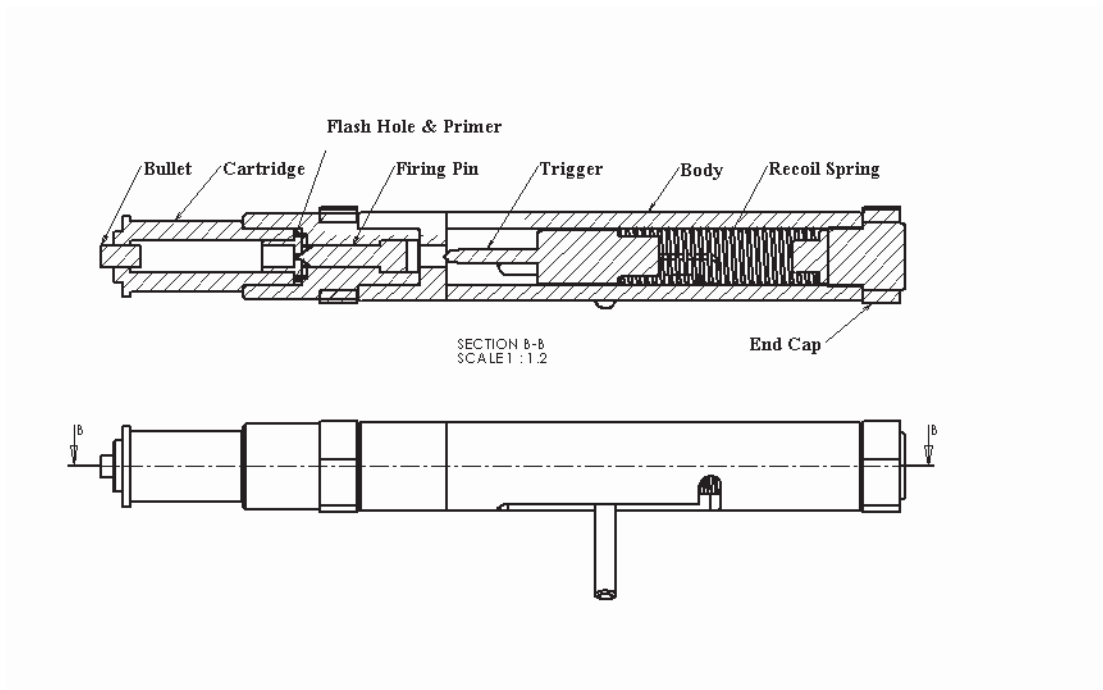
- [1] Methven, T.J., Fairhead, B. “A correlation between rain erosion of perspex specimens in flight and on a ground rig”. *Wear* 2 (6), 498 (1959)
- [2] Methven, T.J., Fairhead, B. “A correlation between rain erosion of perspex specimens in flight and on ground rig”. *Wear* 3 (6), 485 (1960)
- [3] King, R.B. “Rain erosion IV An assessment of various materials”. *Wear* 4 (4), 328 (1961)
- [4] Springer, G.S. “Erosion by liquid impact”. Wiley, New York (1976)
- [5] Adler, W.F., Hooker S.V. “Rain erosion mechanisms in brittle materials”. *Wear* 50 (1), 11-38 (1978)
- [6] Zwaag, V.D., Field, J.E. “Rain erosion damage in brittle materials”. *Eng Fracture Mech* 17 (4), 367-379 (1983)
- [7] Adler, W.F. “Waterdrop impact modeling”. *Wear* 186-187, 341-351 (1995)
- [8] Westmark, C., Lawless, G.W. “A discussion of rain erosion testing at the United States Air Force rain erosion test facility”. *Wear* 186-187 (2), 384-387 (1995)
- [9] Lesser, M., Field, J. “Studies in shock waves, liquid impact, jets and cavitation”. *Proc 1st ISSW In: Takayama, K., (ed.), 61–72 (1991)*
- [10] Bourne, N.K., Field; J.E. “A high-speed photographic study of cavitation damage”. *J App Physics* 78, 4423-4427 (1995)
- [11] Bowden, F.P. Field, J.E. “The brittle fracture of solids by liquid-impact, by solid impact, and by shock”. *Proc Royal Soc London* 282, 331–352 (1964)
- [12] Reichman, J.M., Cheung, J.B. “An oscillating water jet deep-kerfing technique”. *Int J Rock mech. Min. Sci. & Geomech.* 15, 135-144 (1978)
- [13] Vijay, M.M., Brierley, W.H. “Cutting cleaning and fragmentation of materials with high pressure liquid jets”. *Proc 1st U.S. water jet conference*, 272-288 (1981)
- [14] Kobayashi, R., Arai, T., Yamada, H. “Structure of a high-speed water jet and the damage process of metals in jet cutting technology”. *JSME Int J Series B* 31, 53–57 (1988)
- [15] Shi, H.H., Dear, J.P. “Oblique High-speed liquid-solid impact”. *JSME Int J Series I* 35 (1992)
- [16] Shi, H.H., Field, J.E., Pickles, C.S.J. “High speed liquid impact onto wetted solid surfaces”. *J Fluids Eng* 116, 345-348 (1994)

- [17] Yamauchi, Y., Soyama, H., Adachi, Y., Sato, K., Shindo, T., Oba, R., Oshima, R., Yamabe, M. "Suitable region of high-speed submerged water jets for cutting and peening". JSME Int J Series B 38, 31–38 (1995)
- [18] Lesser, M. "Thirty years of liquid impact research: a tutorial review". Wear 186-187, 28–34 (1995)
- [19] Obara, T., Bourne, N.K., Field, J.E. "Liquid-jet impact on liquid and solid surfaces". Wear 186-187 (2), 388-394 (1995)
- [20] Shi, H.H., Takayama, K., Nagayasu, N. "The Measurement of impact pressure and solid surface response in liquid-solid impact up to hypersonic range". Wear 186-187, 352-359 (1995)
- [21] Nakahira, T., Komori, M., Nishida, N., Tsujimura, K. "A study of shock wave generation around high pressure fuel spray in a diesel engine". Proc 2nd ISSW In: Takayama, K., (ed.), 1271–1276 (1991)
- [22] Shi, H.H., Takayama, K., Onodera, O. "Supersonic diesel fuel injection through a single-hole nozzle in a compact gas gun (part 2)", JSME Int J Series B 37 (3), 509-516 (1994)
- [23] Akiyama, H., Nishimura, H., Ibaraki, Y., Iida, N. "Study of diesel spray combustion and ignition using high-pressure fuel injection and a micro-hole nozzle with a rapid compression machine: improvement of combustion using low cetane number fuel". JSAE Review 19, 319–327 (1998)
- [24] Lee, S., Tanaka, D., Kusaka, J., Daisho, Y. "Effects of diesel fuel characteristics on spray and combustion in a diesel engine". JSAE Review 23 (4), 407-414 (2002)
- [25] Shimotani, K., Oikawa, K., Horada, O., Kagawa, Y. "Characteristics of gasoline in-cylinder direct injection engine". JSAE Review 17 (3), 267-272 (1996)
- [26] Kamura, H., Takada, K. "Development of in-cylinder gasoline direct injection engine". JSAE Review 19 (2), 175-180 (1998)
- [27] Alle, J., Hargrave, G. "Fundamental study of in-nozzle fluid flow and its effect on liquid jet break-up in Gasoline Direct injectors". ILASS Europ 2000, I4.2-I4.5 (2000)
- [28] Lee, K.H., Lee, C.H., Lee, C.S. "An experimental study on the spray behavior and fuel distribution of GDI injectors using the entropy analysis and PIV method". Fuel 83 (7-8), 971-980 (2004)
- [29] Billig, F. S. "Research on supersonic combustion". J Propulsion and Power 9 (4), 499–514 (1993)

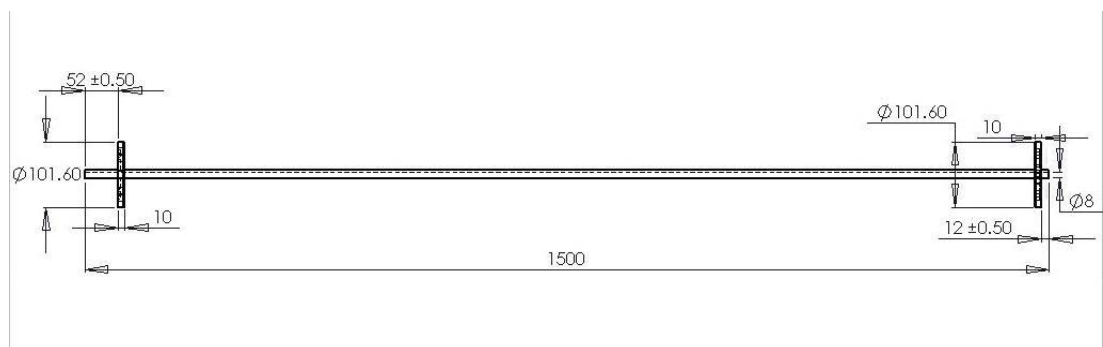
- [30] Ferri, A. "Review of problems in application of supersonic combustion". J Royal Aero Soc 68, 575–597 (1964)
- [31] Rubins, P.M. "Review of shock-induced supersonic combustion research and hypersonic applications". J Propulsion and Power 10 (5), 593–601 (1994)
- [32] Adelberg, M. "Breakup rate and penetration of a liquid jet in a gas stream". AIAA J 5 (8), 1408–1415 (1967)
- [33] Catton, I., Hill, D.E., McRae, R.P. "Study of liquid jets penetration in a hypersonic stream". AIAA J 6 (11), 2084–2089 (1968)
- [34] Kolpin, M.A., Horn, K.P., Reichenbach, R.E. "Study of penetration of a liquid injection into a supersonic flow". AIAA J 6 (5), 853–858 (1968)
- [35] Horn, K.P., Reichenbach, R.E. "Further experiments on spreading References 205 of liquids injected into a supersonic flow". AIAA J 7 (2), 358–359 (1969)
- [36] Edelman, R.B., Schmotolocha, S., Slutsky, S. "Combustion of liquid hydrocarbons in a high-speed air stream". AIAA J 9 (7), 1357–1364 (1971)
- [37] Bowden, F.P., Brunton, J.H. "Damage to solids by liquid impact at supersonics speeds". Nature 181, 873–875 (1958)
- [38] Bowden, F.P., Brunton, J.H. "The deformation of solids by liquid impact at supersonic speeds". Proc Royal Society London 263 (series A), 433–450 (1961)
- [39] Ohki, T., Nakagawa, A., Tominaga, T., Takayama, K. "Experimental application of Pulsed Ho: YAG laser-induced liquid jet as a novel device for rigid neuroendoscope". Laser Surg Med 34, 227 (2004),
- [40] Nakagawa, A., Hirano, T., Komatsu, M., Sato, M., Uenohara, H., Ohgawa, H., Kusada, Y., Shirane, R., Takayama, K., Yoshimoto, T. "Holmium: YAG laser-induced liquid jet knife: possible novel method for dissection". Lasers Surg Med 31, 125 (2002)
- [41] Hirono, T., Uenohara, H., Komatsu, M., Nakagawa, A., Satoh, M., Ohyama, H., Takayama, K., Yoshimoto, T. "Holmium YAG laser-induced liquid jet dissector: A novel prototype device for dissection organs without impairing vessels". Minim Invas Neurosurg 46, 121 (2003)
- [42] Iwasaki, M. "Application of Water Jet for Drilling Rocks Undersea". Turbomachinery 17 (12), 761–767 (1989) (In Japanese)
- [43] Soyama H., Yanauchi Y., Sato K., Ikohagi T., Oba R. and Oshima R. "High-Speed Observation of Ultrahigh-Speed Submerged Water Jets", Experimental Thermal and Fluid Science 12:411–4162, 1996

- [44] คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ฟิสิกส์ 1. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538
- [45] Patrick H. Oosthuizen and William E. Carscallen. Compressible fluid flow. USA : McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1997
- [46] <http://www.optaminerals.com/Water-Jet-Cutting/>
- [47] <http://www.hayes-stolz.com/lwjpages/lwjhome.html>
- [48] http://www.acp-micron.com/5699_CO2-Schneestrahl-Reinigung.html?lang=1
- [49] http://www.planebuzz.com/2008/06/oil_goes_on_a_tear_jet_fuel_fo.html
- [50] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jet_engine.svg
- [51] Pianthong K., Zakrzewski S., Behnia M. and Milton B.E. “Supersonic liquid jets: Their generation and shock wave characteristics”, Shock Waves 11: 457–466, 2002
- [52] Pianthong K., Zakrzewski S., Behnia M. and Milton B.E. “Characteristics of impact driven supersonic liquid jets”, Experimental Thermal and Fluid Science 27 589–598, 2003
- [53] Matthujak A., Hosseini S. H. R., Takayama K., Sun M. and Voinovich P. “High speed jet formation by impact acceleration method”, Shock Waves 16: 405–419, 2007
- [55] Ohtani, K. Numata, D. Takayama, K. Kobayashi, T. Okatsu, K. “Experimental study of underwater rock drilling using a pulsed Ho : YAG laser-induced jets”. Shock wave 19, 403–412 (2009)
- [54] วีระพันธ์ สีหนาม , วุฒิชัย สิทธิวงษ์, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และ อนิรุตต์ มัทธจักร์. “การจำลองคุณลักษณะเบื้องต้นของลำพุ่งเชื้อเพลิงความเร็วสูง”. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, 2550.

ภาคผนวก ก
การออกแบบชุดทดลอง



รูปที่ ก.1 ชุดปล่อยกระสุนปืน (launcher หรือ powder gun)



รูปที่ ก.2 ท่อส่งกระสุนปืน (launch tube)

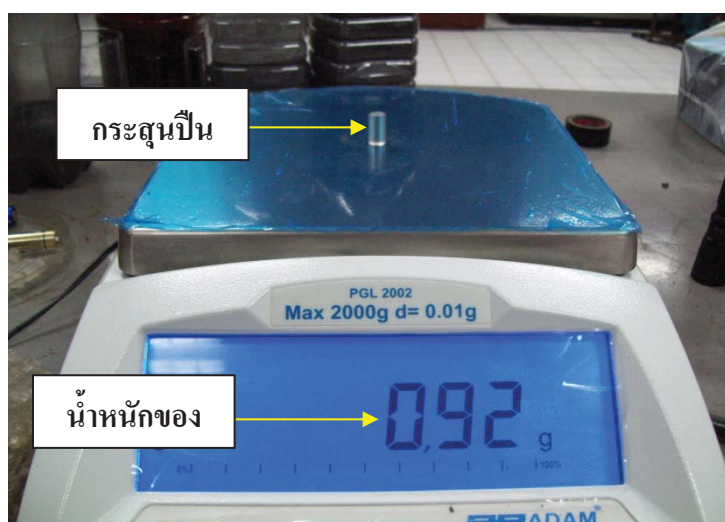
ภาคผนวก ข
ขั้นตอนการทดลองยิงกระสุนปืนความเร็วสูง

ข.1 วิธีทำการทดลองยิงกระสุนปืนความเร็วสูง

การทดลองยิงกระสุนความเร็วสูงเพื่อใช้ในการผลิตลำพุ่งความเร็วสูงนั้นในแต่ละขั้นตอนการทดลองผู้ทำการทดลองต้องคำนึงถึงความความปลอดภัยและความละเอียดรอบคอบ ซึ่งมีรายละเอียดในการทำการทดลองดังนี้

ข.1.1 การชั่งมวลของกระสุนและการวัดขนาดของกระสุนปืน

เนื่องจากมวลของกระสุนปืนและขนาดของกระสุนปืนที่แตกต่างกันนั้นอาจมีผลทำให้ความเร็วของกระสุนปืนที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่าง ดังนั้นในการทดลองแต่ละครั้งจึงต้องมีการชั่งและการวัดกระสุนปืนทุกครั้ง ดังรูปที่ ข.1 และ ข.2



รูปที่ ข.1 ชั่งมวลของกระสุนปืน



รูปที่ ข.2 วัดขนาดของกระสุนปืน

ข.1.2 การบรรจุกระสุนปืน

เมื่อทำการวัดขนาดและชั่งมวลของกระสุนปืนแล้ว จากนั้นทำการบรรจุกระสุนปืนโดยในการบรรจุไม่สามารถบรรจุกระสุนเข้ากับปลอกกระสุนได้โดยง่าย ดังนั้นจึงต้องมีเครื่องช่วยบรรจุกระสุนปืน โดยการอัดให้เหลือกระสุนพ้นจากปลอกกระสุน 5 mm. ดังรูปที่ ข.3



(a) ก่อนการบรรจุกระสุน



(b) หลังจากการบรรจุกระสุน

รูปที่ ข.3 บรรจุกระสุนปืน

ข.1.3 การบรรจุดินปืน

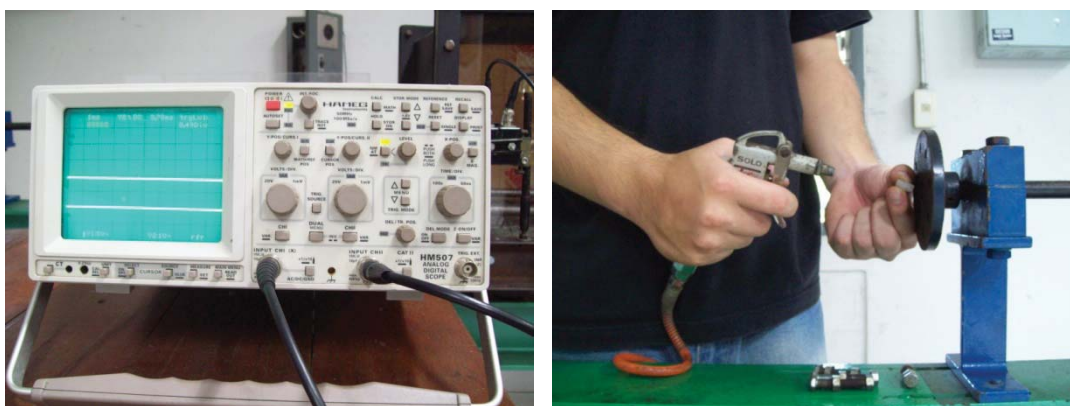
หลังจากบรรจุกระสุนเสร็จแล้ว ขั้นตอนการบรรจุดินปืนทำได้โดยการชั่งน้ำหนักดินปืนด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลและใส่ไพโรเมอร์ (แก๊ป) โดยการติดด้วยเทปใส ดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 บรรจุปืนและติดไฟแฟลช

ข.1.4 การเชื่อมต่อสัญญาณ laser beam และ oscilloscope

เมื่อเสร็จขั้นตอนต่างๆที่ผ่านมาแล้ว ก่อนที่จะทำการประกอบชุดปืนเข้ากับชุดทดลองต้องมีการเชื่อมต่อสัญญาณ laser beam และ oscilloscope ทุกครั้งโดยการยิงกระสุนปืนด้วยปืนลม ดังรูปที่ ข.5



รูปที่ ข.5 เชื่อมสัญญาณ laser beam และ oscilloscope

ข.1.5 ประกอบชุดปืน

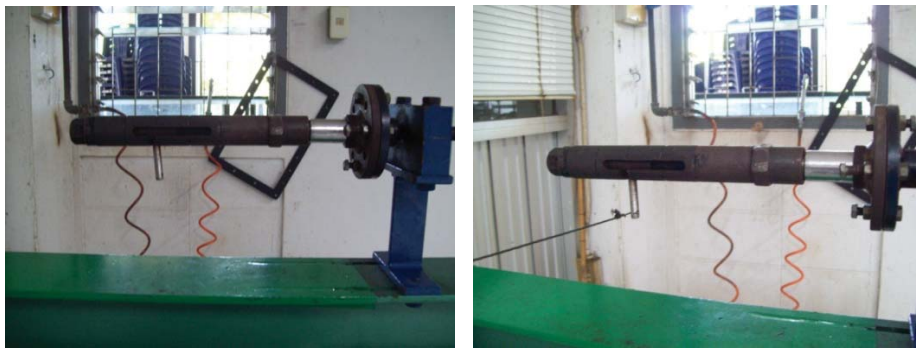
จากนั้นก็ทำการประกอบชุดปืนเข้ากับชุดทดลองโดยประกอบปลอกกระสุนเข้ากับหน้าแปลนของลำกล้องก่อน แล้วจึงประกอบชุดปืนที่ใช้ในการจุดชนวน ดังรูปที่ ข.6



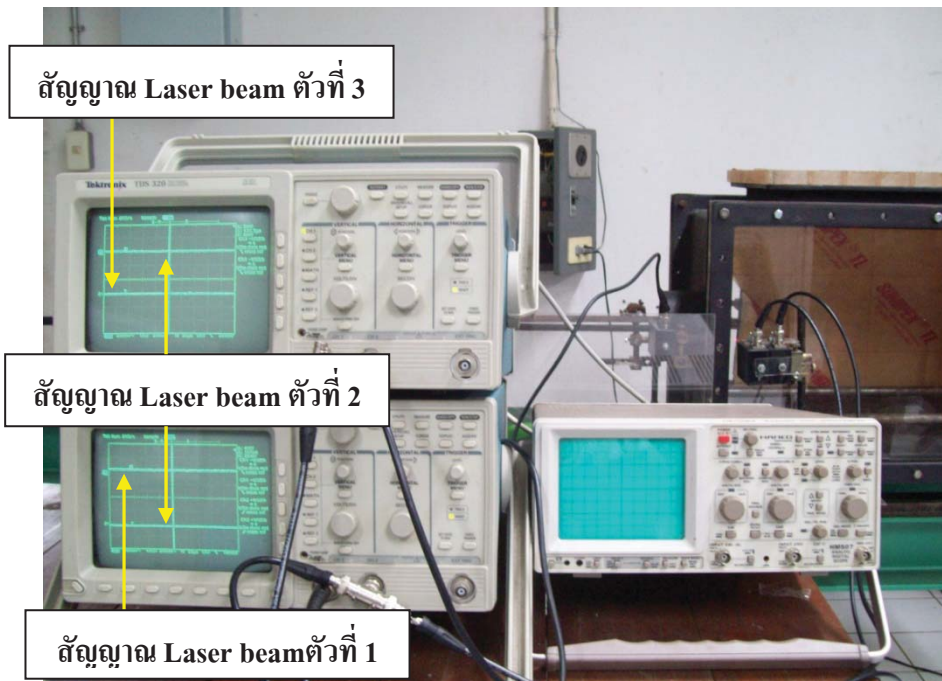
รูปที่ ข.6 การประกอบชุดปืน

ข.1.6 การยิง

เนื่องจากในขั้นตอนการยิงนั้นเป็นขั้นตอนที่มีความอันตรายสูงและต้องใช้ความระมัดระวัง ดังนั้นในการยิงจึงใช้ตะขอเกี่ยวโกปิ่นที่ร้อยด้วยเชือกเพื่อทำการที่จะลั่นโกปิ่นที่ระยะห่างจากชุดทดลองประมาณ 4-5 m. ดังรูปที่ ข.7 เป็นการสิ้นสุดการทดลอง จากนั้นทำการตรวจวัดความเร็วด้วย oscilloscope ดังรูปที่ ข.8

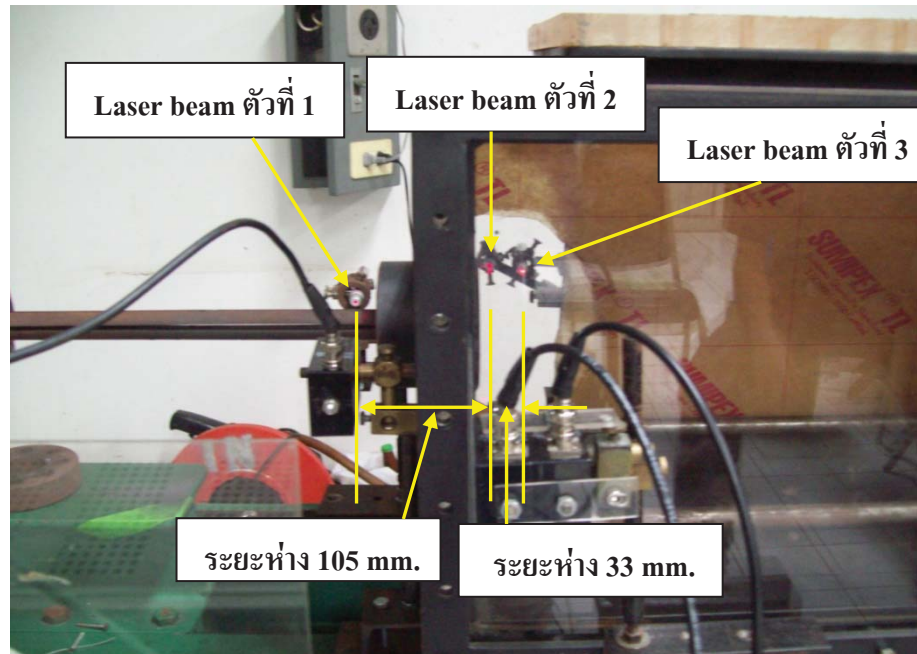


รูปที่ ข.7 การยิง



(a) ตำแหน่ง laser beam บนหน้าจอ oscilloscope

รูปที่ ข.8 (a) ตำแหน่ง laser beam บนหน้าจอสื่อ oscilloscope และ (b) ตำแหน่งติดตั้ง laser beam



(b) ตำแหน่งติดตั้ง laser beam

รูปที่ ข.8 (a) ตำแหน่ง laser beam บนหน้าจอสื่อ oscilloscope และ (b) ตำแหน่งติดตั้ง laser beam (ต่อ)

ตารางที่ ข.1 ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลอง laser 1 และ laser 2 ระยะห่าง Δs_1

มวลของดินปืน (g)	ครั้งที่	มวลของกระสุน (g)	ขนาดของกระสุน (mm)	Δt (μs)	Δs (mm)	Δv (m/s)
4.0	1	0.92	8.00	144	105	729.17
	2	0.92	8.00	143.5	105	731.71
	3	0.92	8.00	149.5	105	702.34
ค่าเฉลี่ย						<u>721.07</u> +10.64 -18.73
4.5	1	0.92	8.00	130.5	105	804.60
	2	0.92	8.00	134	105	783.58
	3	0.92	8.00	132.5	105	792.45
ค่าเฉลี่ย						<u>793.45</u> +11.06 -9.96
5.0	1	0.92	8.00	129.5	105	810.81
	2	0.92	8.00	129	105	813.95
	3	0.92	8.00	127.5	105	823.53
ค่าเฉลี่ย						<u>816.10</u> ^{+7.43} _{-5.29}
5.5	1	0.92	8.00	119	105	882.35
	2	0.92	8.00	113.5	105	925.11
	3	0.92	8.00	114.9	105	921.05
ค่าเฉลี่ย						<u>909.51</u> ^{+15.6} _{-27.16}
6.0	1	0.92	8.00	105	105	1000
	2	0.92	8.00	109	105	963.30
	3	0.92	8.00	112	105	937.50
ค่าเฉลี่ย						<u>966.93</u> ^{+33.07} _{-29.43}

ตารางที่ ข.1 ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลอง laser 1 และ laser 2 ระยะห่าง Δs_1 (ต่อ)

มวลของดินปืน (g)	ครั้งที่	มวลของกระสุน (g)	ขนาดของกระสุน (mm)	Δt (μs)	Δs (mm)	Δv (m/s)
6.5	1	0.92	8.00	103	105	1,019.42
	2	0.92	8.00	103.5	105	1,014.49
	3	0.92	8.00	103	105	1,019.42
ค่าเฉลี่ย						<u>1,017.78</u> +1.64 -3.29
7.0	1	0.92	8.00	94.5	105	1,111.11
	2	0.92	8.00	92	105	1,141.30
	3	0.92	8.00	95	105	1,105.26
ค่าเฉลี่ย						<u>1,119.2</u> ^{+22.07} _{-13.97}

ตารางที่ ข.2 ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลอง laser 2 และ laser 3 ระยะห่าง Δs_2

มวลของดินปืน (g)	ครั้งที่	มวลของกระสุน (g)	ขนาดของกระสุน (mm)	Δt (μs)	Δs (mm)	Δv (m/s)
4.0	1	0.92	8.00	37	33	891.89
	2	0.92	8.00	37	33	891.89
	3	0.92	8.00	39.5	33	835.4
ค่าเฉลี่ย						<u>873.08</u> +18.81 -37.64
4.5	1	0.92	8.00	39	33	846.15
	2	0.92	8.00	36	33	916.67
	3	0.92	8.00	37	33	891.89
ค่าเฉลี่ย						<u>884.90</u> +31.77 -38.75
5.0	1	0.92	8.00	35.5	33	929.58
	2	0.92	8.00	35	33	942.86
	3	0.92	8.00	33.5	33	985.07
ค่าเฉลี่ย						<u>952.50</u> +32.57 -22.92
5.5	1	0.92	8.00	32	33	1,031.25
	2	0.92	8.00	29.5	33	1,118.64
	3	0.92	8.00	31.5	33	1,047.62
ค่าเฉลี่ย						<u>1,065.8</u> ^{+52.8} _{-34.59}
6.0	1	0.92	8.00	27.5	33	1,200
	2	0.92	8.00	28	33	1,178.57
	3	0.92	8.00	29	33	1,137.93
ค่าเฉลี่ย						<u>1,172.1</u> ^{+27.83} _{-34.24}

ตารางที่ ข.2 ความเร็วของกระสุนปืนจากการทดลอง laser 2 และ laser 3 ระยะห่าง Δs_2 (ต่อ)

มวลของดินปืน (g)	ครั้งที่	มวลของกระสุน (g)	ขนาดของกระสุน (mm)	Δt (μs)	Δs (mm)	Δv (m/s)
6.5	1	0.92	8.00	27	33	1,222.22
	2	0.92	8.00	27.5	33	1,200.00
	3	0.92	8.00	27	33	1,222.22
ค่าเฉลี่ย						$\underline{1,214.8}$ $+7.41$ -14.81
7.0	1	0.92	8.00	25.5	33	1,294.12
	2	0.92	8.00	25	33	1,320.00
	3	0.92	8.00	26	33	1,269.23
ค่าเฉลี่ย						$\underline{1,294.4}$ $+25.55$ -25.22

ภาคผนวก ค
ผลสำเร็จจากการดำเนินโครงการ

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Matthujak, A., Kachaeamnitpor, C., Sittiwong, W., Seehanam, W. and Pianthong, K.: Characteristics of High-Speed liquid jets in water. The 1st International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME), Ubon Ratchathani, Thailand, 20th – 22nd October, 2010, paper no. AME004
- [2] A. Matthujak, C. Kachaeamnitpor, W. Sittiwong, W. Seehanam, K. Pianthong and K. Takayama, “Effects of different liquid properties on the characteristics of high-speed liquid jets injected in water,” The International Conference of Experiment Mechanics 2010 (ICEM 2010), paper page no. 132, Malaysia, 28 November - 1 October 2010.
- [3] ชัยเดช เกษมนิมิตรพร , อนิรุตต์ มัทธจักร , วุฒิชัย สิทธิวงษ์ และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง “คุณลักษณะของลำพุ่งน้ำความเร็วสูงที่ฉีดในของเหลว” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่ 6, ฉบับที่ 2, 2554, 1-10