

บทความวิชาการ (Article)

ฟิสิกส์ของการสะท้อนกลับจากการกระทบของหยดของเหลว

คามิน กาญจนประดิษฐ์ สุภกฤษณ์ ทรัพย์สุวรรณ และ พรรณศิริ คำโอ

สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอความรู้เกี่ยวกับปรากฏการณ์สะท้อนกลับจากการกระทบของหยดของเหลว ที่ได้รวบรวมจากบทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในวารสารทางวิชาการ โดยนักวิจัยได้อธิบายในมุมมองการเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงาน และผลของความหนืด ความตึงผิว และอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว ในการศึกษาเรื่องนี้ นักวิจัยใช้วิธีการบันทึกภาพเคลื่อนไหวด้วยกล้องความเร็วสูง แล้วนำภาพแต่ละเฟรมไปวิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ เช่น อัตราเร็วขณะตกกระทบ ขนาดของหยดของเหลว โพรงที่เกิดจากการตกกระทบ และการสะท้อนกลับหลังการตกกระทบ เป็นต้น การศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์สะท้อนกลับของหยดของเหลวช่วยให้มีความเข้าใจฟิสิกส์ของของเหลว แล้วสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อาทิเช่น การพัฒนาเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท และการสืบสวนในทางนิติวิทยาศาสตร์จากคราบของเหลว ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทความนี้ด้วย

คำสำคัญ: การสะท้อนของหยดของเหลว, การตกกระทบของหยดของเหลว, เลขฟรูด, เลขเวเบอร์, เลขเรย์โนลด์

Abstract

This article presents knowledge associated with a phenomenon of rebound from drop impact of liquid, from research papers published in academic journals. Researchers explained the phenomenon in viewpoint of energy change, and effects of viscosity, surface tension, and temperature of liquid on the drop impact. The researchers recorded motion pictures by using a high-speed camera. Velocity, size, formation of cavity, and rebound from the drop impact were quantitatively studied by frame-by-frame analysis. Understanding of physical phenomena of the drop impact can be applied, for example, in development of ink-jet printers, and for investigation of liquid stains in forensic science. Explanation of the examples is also included in following content.

Keywords: rebound of liquid, drop impact, Froude number, Weber number, Reynolds number



(a)



(b)

รูปที่ 1 (a) ภาพนิ่งจากการสะท้อนของหยดของเหลวหลังการตกกระทบ [1] และ (b) QR-code ของวิดีโอคลิปแสดงการตกกระทบและการสะท้อนของหยดน้ำ [2]

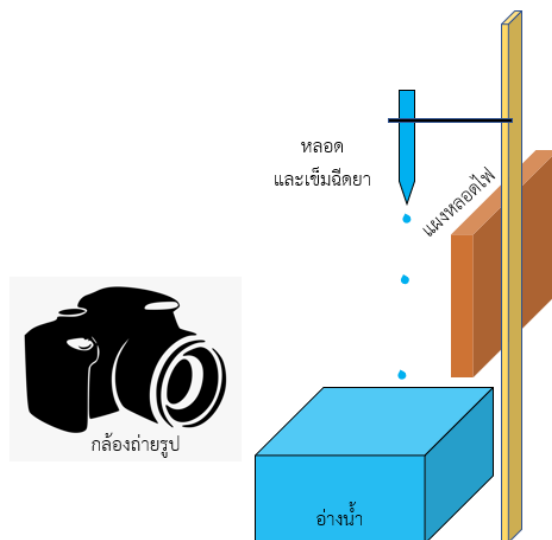
ปรากฏการณ์สะท้อนกลับของหยดของเหลว เป็นปรากฏการณ์ที่ลำของเหลวพุ่งขึ้นมา หลังจากเกิดการตกกระทบบนผิวของเหลวชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยมีลักษณะการตกและสะท้อนกลับดังภาพนิ่งและคลิปวิดีโอ ปรากฏการณ์นี้อาจจะมีหยดของเหลวทรงกลมเกิดขึ้นบนลำของเหลวดังกล่าว ก่อนที่จะตกกลับลงสู่พื้นผิวเดิม

ในการศึกษาเกี่ยวกับการสะท้อนของหยดของเหลว นักวิทยาศาสตร์ให้ความสนใจพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ อัตราเร็วของหยดของเหลวขณะตกกระทบ (v_i) เส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของเหลวที่ตกกระทบ (D_d) ความหนาแน่น (ρ_l) ความหนืด (μ_l) ความตึงผิว (γ) รวมทั้งการอธิบายปรากฏการณ์ในเชิงพลังงานรูปต่าง ๆ ได้แก่ พลังงานจลน์ (T) พลังงานศักย์โน้มถ่วง (U) และพลังงานคาปิลลารี (capillary energy; C) อีกด้วย การวัดค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวมาทำได้โดยวิธีถ่ายภาพวิดีโอ แล้วนำภาพแต่ละเฟรมมาวิเคราะห์ การถ่ายภาพวิดีโอเพื่อการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์นิยมถ่ายด้วยกล้องที่มีความเร็วสูง

การจัดวางอุปกรณ์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์สะท้อนกลับของหยดของเหลว

ในบทความนี้จะยกเอาตัวอย่างการศึกษาการสะท้อนกลับของหยดของเหลวจากบทความของทีมนักวิจัยชาวฝรั่งเศส มิซองและคณะ (Guy-Jean Michon, Christophe Josserand และ Thomas Seon) บทความนี้ถูกเผยแพร่ในวารสาร Physical Review Fluids เมื่อปี ค.ศ. 2017 [3] ทีมนักวิจัยใช้กล้องความเร็วสูงถึง 8,000 fps กล้องความเร็วสูงมักถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการวัดความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนไหวนเร็วกว่าที่สายตาสังเกตได้ทัน เช่น ความเร็วของกระสุนปืน ความเร็วของลูกเทนนิส การระเบิด เป็นต้น กล้องชนิดนี้มีราคาสูง อย่างเช่น ยี่ห้อ Photron มีราคาประมาณ 457,000 ดอลลาร์สหรัฐหรือคิดเป็นเงินไทยประมาณ 14 ล้านบาท [4]

ทีมวิจัยของมิซองเริ่มต้นศึกษาปรากฏการณ์สะท้อนกลับของหยดของเหลว โดยใช้หยดจากปลายเข็มฉีดยา หยดน้ำจากปลายเข็มดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.7 mm ตกลงอย่างอิสระจากความสูงใด ๆ กระพ่นน้ำที่บรรจุในภาชนะแก้วใสเพื่อให้สามารถสังเกตลักษณะของน้ำหลังจากการตกกระทบได้อย่างชัดเจน และได้บันทึกปรากฏการณ์นี้ด้วยกล้องวิดีโอที่ถูกจัดวางไว้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การจัดอุปกรณ์เพื่อบันทึกวิถีโคจรของปรากฏการณ์การตกของหยดน้ำบนผิวน้ำและการสะท้อนกลับ

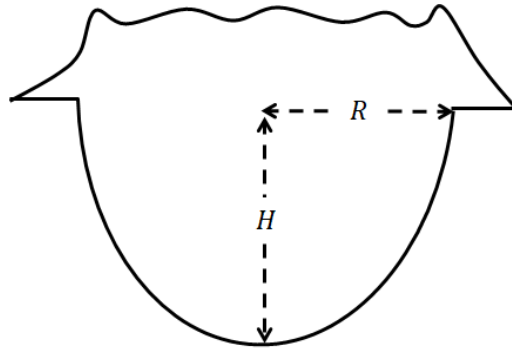
อ่างน้ำในรูปที่ 2 เป็นภาชนะแก้วใส ถูออกแบบให้มีพื้นที่หน้าตัดและความลึกที่มากพอ เพื่อป้องกันผลจากการเกิดคลื่นสะท้อนกับผนังภาชนะ แต่อย่างไรก็ตาม ทีมของมิชองมิได้ให้ข้อมูลของระยะห่างระหว่างหยดของเหลวตอนเริ่มต้นกับผิวน้ำในอ่าง และขนาดของอ่างที่ใช้ในการทดลอง

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ทีมวิจัยของมิชองไม่ได้อธิบายไว้ในบทความวิจัย ผู้เขียนบทความนี้ จึงได้ทดลองตามวิธีที่ทีมของมิชองเสนอไว้ในรายงาน [3] ทำให้ทราบว่าการตกอย่างอิสระของหยดน้ำจากความสูงไม่เกิน 150 cm ภาชนะแก้วบรรจุน้ำควรมีขนาดพื้นที่หน้าตัดอย่างน้อย $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ และลึกไม่น้อยกว่า 5 cm นอกจากนี้ ด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์บันทึกภาพ ที่ผู้เขียนบทความไม่สามารถหากล้องความเร็วสูงได้ จึงได้ใช้กล้องความเร็ว 120 fps (ปัจจุบันความเร็วระดับนี้มีในกล้องของสมาร์ทโฟนหลาย ๆ รุ่น) ซึ่งพบว่าสามารถบันทึกภาพที่มีคุณภาพระดับที่เพียงพอสำหรับการศึกษาทางฟิสิกส์ ในส่วนของการวิเคราะห์ภาพนั้น ได้ใช้โปรแกรม Tracker ซึ่งสามารถดาวน์โหลดมาใช้โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายใด ๆ [5] อีกประการหนึ่งที่ผู้เขียนบทความวิชาการต้องการเสนอแนะ คือประเด็นที่เกี่ยวกับแสงสว่างที่ใช้ในการถ่ายภาพ ว่าควรใช้แสงที่มีความสว่างเพียงพอมาตกกระทบวัตถุเพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจน และหลอดไฟก็ควรเป็นหลอดที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้องกันการกระพริบของภาพจากการบันทึกวิดีโอ

การอธิบายปรากฏการณ์สะท้อนกลับของหยดของเหลวในเชิงพลังงาน

หลังการตกกระทบของหยดน้ำจากปลายเข็มฉีดยาลงบนผิวน้ำในภาชนะ ทำให้ผิวน้ำเกิดโพรง (cavity) ดังรูปที่ 3 โพรงนี้จะกลับสู่สภาพเดิมด้วยแรงคาปิลลารี (capillary force) และแรงโน้มถ่วง (gravitational force) โดยที่แรงคาปิลลารีทำหน้าที่ช่วยดึงน้ำขึ้นไปตามแนวโค้งของโพรง ส่วนแรงโน้มถ่วงทำหน้าที่ดึงน้ำจากส่วนบนของโพรงกลับลงมา ถ้าโพรงที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก แรงคาปิลลารีจะส่งผลต่อ

การทำให้ผิวน้ำกลับสู่สภาพเดิมมากกว่าแรงโน้มถ่วง ในทางกลับกันหากโพรงมีขนาดใหญ่ขึ้น แรงโน้มถ่วงจะส่งผลต่อการทำให้ผิวน้ำกลับสู่สภาพเดิมมากกว่าแรงคาปิลลารี



รูปที่ 3 โพรงที่เกิดที่เกิดจากการตกกระทบของหยดน้ำบนผิวน้ำ มีความลึก H รัศมี R

ทิมวิชัยของมิของคำนวณค่าพลังงานศักย์โน้มถ่วง พลังงานคาปิลลารี และพลังงานจลน์ จากสมการที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ พลังงานศักย์โน้มถ่วง U แปรผันตรงกับความลึกยกกำลังสอง (H^2) และรัศมียกกำลังสอง (R^2) ของโพรงที่เกิดจากการตกกระทบของหยดน้ำ ค่าเหล่านี้สามารถวิเคราะห์ได้จากภาพนิ่งแต่ละเฟรมจากวิดีโอ

$$U \sim \frac{\pi}{2} \rho_l g H^2 R^2 \quad (1)$$

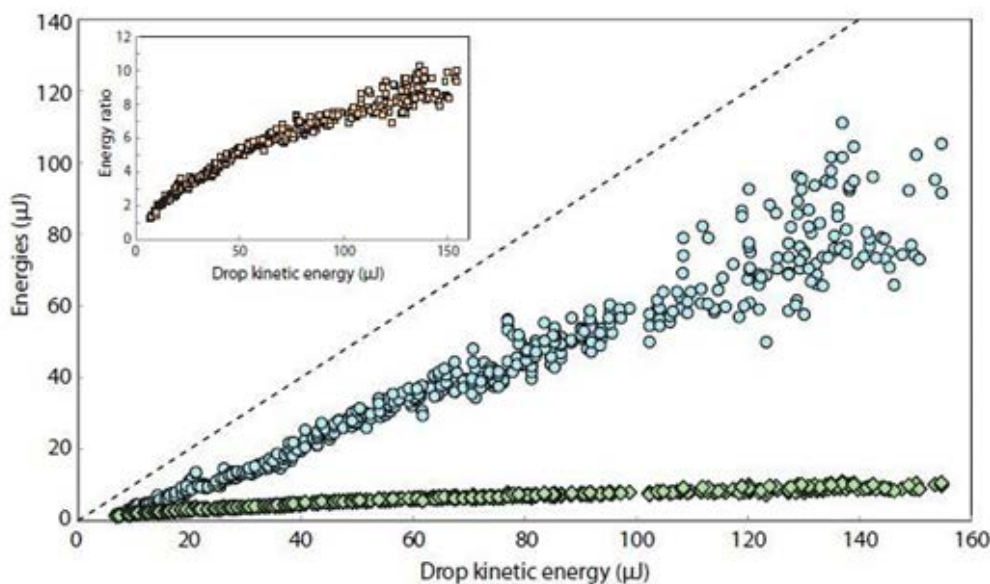
เมื่อ ρ_l เป็นความหนาแน่นของของเหลว และ g เป็นค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก พลังงานคาปิลลารี (C) ขึ้นอยู่กับขนาดของโพรงและความตึงผิว ดังสมการ

$$C \sim 2\pi\gamma HR \quad (2)$$

เมื่อ γ คือค่าความตึงผิวของของเหลว สำหรับพลังงานจลน์ (T) ของหยดของเหลวขณะตกกระทบขึ้นอยู่กับมวล M_d ของของเหลว นั่น ๆ และอัตราเร็วขณะตกกระทบยกกำลังสอง (v_i^2) คำนวณได้จาก

$$T = \left(\frac{1}{2}\right) M_d v_i^2 \quad (3)$$

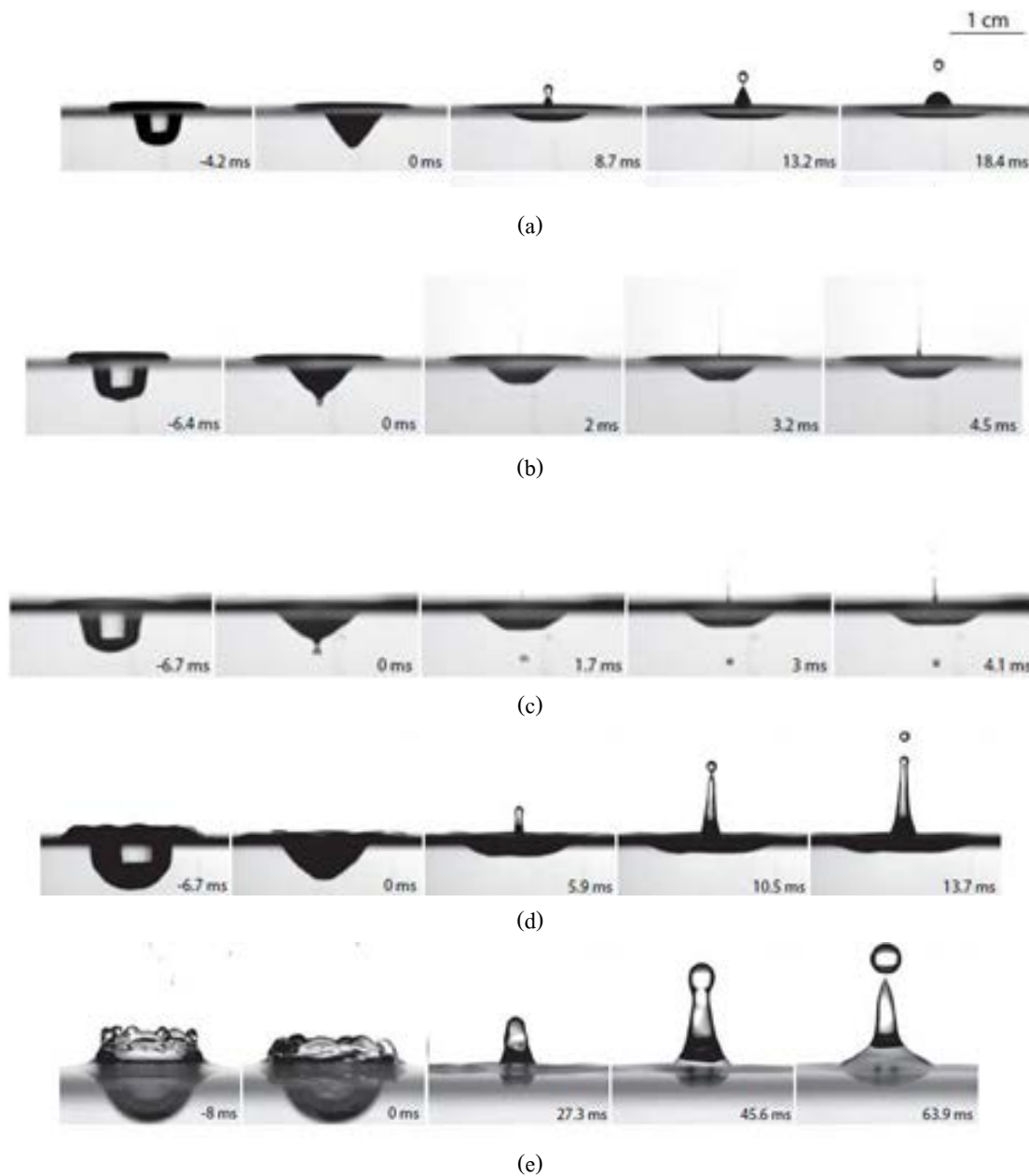
ทิมวิชัยของมิของได้ศึกษาความสัมพันธ์ของพลังงานต่าง ๆ ได้แก่ พลังงานศักย์โน้มถ่วงกับพลังงานจลน์ พลังงานคาปิลลารีกับพลังงานจลน์ และอัตราส่วนพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อพลังงานคาปิลลารีกับพลังงานจลน์ แสดงไว้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของพลังงานศักย์โน้มถ่วง (วงกลมสีน้ำเงิน) พลังงานคาปิลลารี (เพชรสีเขียว) อัตราส่วนของพลังงานทั้งสอง (สี่เหลี่ยมสีเหลือง) กับพลังงานจลน์ของการตก ตามลำดับ [3]

จากรูปที่ 4 เมื่อหยดน้ำตกกระทบผิวน้ำด้วยความเร็วที่มากขึ้น (ค่าพลังงานจลน์มากขึ้น) พบว่าพลังงานศักย์โน้มถ่วงและพลังงานคาปิลลารีจะมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งที่วิจัยของมิซงสังเกตได้ว่า ที่ค่าของพลังงานจลน์ไม่เกิน 10 μJ พลังงานจลน์จะเปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์โน้มถ่วงและเป็นพลังงานคาปิลลารีในปริมาณใกล้เคียงกัน และที่พลังงานจลน์มีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่า 10 μJ พลังงานคาปิลลารีจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของพลังงานศักย์โน้มถ่วง ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานที่กล่าวมาสามารถใช้อธิบายขนาดของหลุมที่เกิดจากการตกกระทบ นั่นคือหลุมจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมีพลังงานจลน์ของการตกกระทบมากขึ้นนั่นเอง และที่วิจัยของมิซง ยังพบอีกว่าที่พลังงานจลน์สูงสุดจากการทดลอง พลังงานศักย์โน้มถ่วงมีค่ามากกว่าพลังงานคาปิลลารีถึง 10 เท่า หากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานจากการตกกระทบครั้งใด ๆ จะสังเกตได้ว่าผลรวมของพลังงานทั้งสอง (พลังงานศักย์โน้มถ่วงและพลังงานคาปิลลารี) จะมีค่าน้อยกว่าพลังงานจลน์ หนึ่ง ในการคำนวณค่าพลังงานที่กล่าวมา ผู้วิจัยได้ประมาณรูปร่างของหลุมจากการตกกระทบเป็นทรงกระบอก และประมาณว่าพลังงานบางส่วนที่หายไปจากการเกิดคลื่นและหยดน้ำเล็ก ๆ หลังการตกกระทบ มีค่าน้อยมาก

ลักษณะการตกและการสะท้อนของหยดน้ำที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 5 ลำดับภาพจากตั้งแต่เกิดการตกกระทบของหยดน้ำจนกระทั่งเกิดการสะท้อนกลับ ที่อัตราเร็วและขนาดของหยดน้ำขณะตกกระทบแตกต่างกัน (a – e) ซึ่งเรียงลำดับจากมากไปน้อย [3]

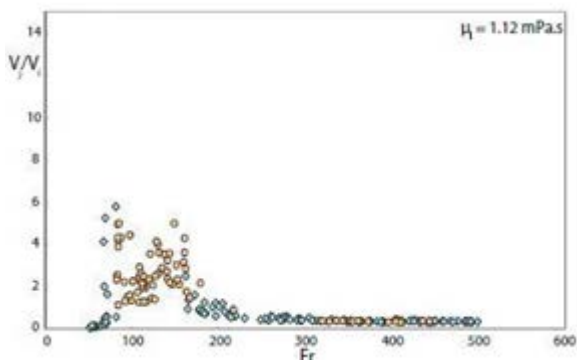
การตกกระทบของหยดน้ำทำให้เกิดการพุ่งขึ้นของน้ำเหนือผิวน้ำ (Rayleigh jet หรือ Worthington jet) ในที่นี้จะเรียกว่า “เจ็ท” (jet) ที่บริเวณปลายด้านบนของเจ็ทอาจมีน้ำส่วนหนึ่งที่แยกออกมา อาจมีจำนวนหนึ่งหยดหรือมากกว่าก็ได้ ความเร็วและรูปร่างของเจ็ทอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของหยดน้ำขณะตกกระทบ ขนาดของหยดน้ำที่ตกกระทบ และความหนืด ในบทความวิจัยของมิซง

และคณะ ได้นำเสนอความเร็วของหยดน้ำขณะตกกระทบในเทอมของเลขฟรูด (Froude number, Fr) ค่าของเลขฟรูดสื่อถึงอัตราส่วนของอัตราเร็วกำลังสองต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำที่ตกกระทบ เลขฟรูดคำนวณได้จากสมการที่ 4

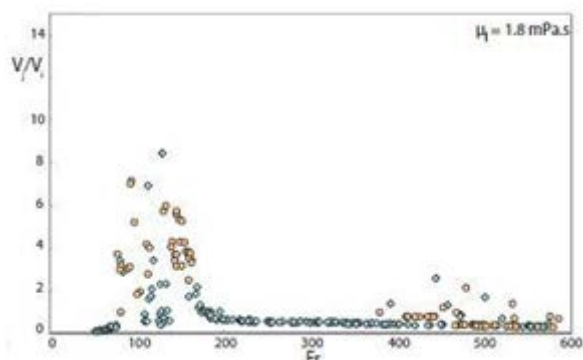
$$Fr = \frac{v_i^2}{gD_d} \quad (4)$$

จากรูปที่ 5 จาก (a – e) เลขฟรูดมีค่าเป็น 93.5, 127.5, 145, 348 และ 926 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเลขฟรูดสูงขึ้น ขนาดของโพรงจากการตกกระทบก็จะใหญ่ขึ้นด้วย เจ็ทที่พุ่งขึ้นมาและหยดน้ำมีขนาดหลากหลาย ในรูป (a) ผู้ทดลองสังเกตเห็นว่าเจ็ทพุ่งขึ้นมาเหนือผิวน้ำอย่างช้า ๆ และมีขนาดเล็ก ในรูป (b) และ (c) เจ็ทเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแต่มีลักษณะบาง ส่วนรูป (d) และ (e) เจ็ทเคลื่อนที่ขึ้นจากผิวน้ำช้าและมีขนาดใหญ่ ในบางครั้งหลังการตกกระทบแล้วเกิดโพรงยุบลงไปใน อากาศมีฟองอากาศเกิดขึ้นที่บริเวณด้านล่างของโพรง (subcavity) โดยฟองนี้จะค้างตัวลึกลงไปแล้วเคลื่อนที่กลับมาด้านบน ดังที่ปรากฏในรูป (b) และ (c)

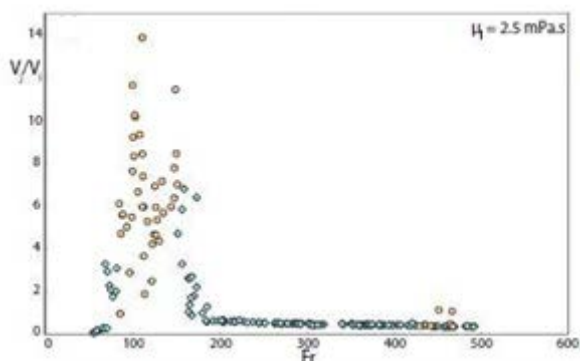
นอกจากนี้ทีมวิจัยของมิซงยังได้ศึกษาผลของความหนืดต่อการสะท้อนกลับของหยดของเหลว โดยใช้ของเหลวที่มีความหนืดแตกต่างกัน 6 ค่า ได้แก่ 1.12, 1.8, 2.5, 6, 12.5 และ 15 mPa·s จากนั้นได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขฟรูดกับอัตราส่วนของอัตราเร็วเจ็ทต่ออัตราเร็วขณะตกกระทบของหยดน้ำ ดังรูปที่ 6 ทีมวิจัยของมิซงได้สังเกตพบสิ่งที่น่าสนใจคือ ที่ความหนืดตั้งแต่ 6 mPa·s ลงไป อัตราส่วนความเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดสูงขึ้น แต่สำหรับความหนืดที่มีค่าสูงกว่า 6 mPa·s ค่าสัดส่วนความเร็วจะลดลงเมื่อความหนืดสูงขึ้น เมื่อพิจารณาที่ค่าเลขฟรูดประมาณ 300 ขึ้นไป ค่าสัดส่วนของอัตราเร็วจะไม่ขึ้นอยู่กับความหนืด



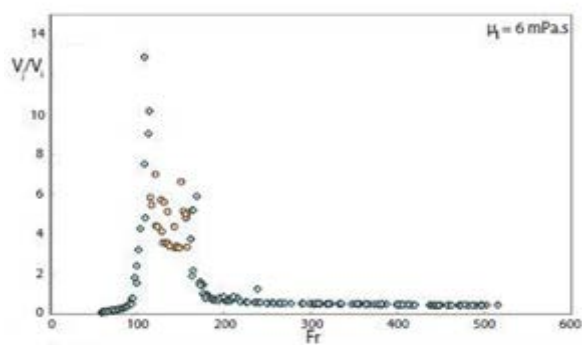
(a)



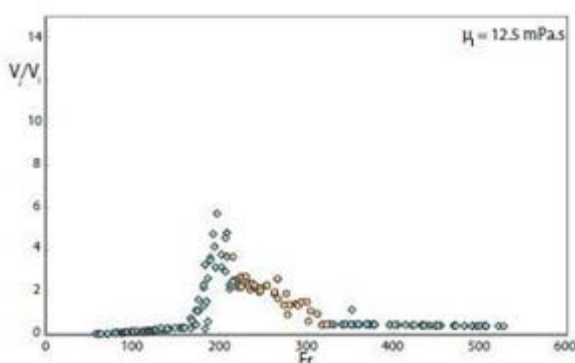
(b)



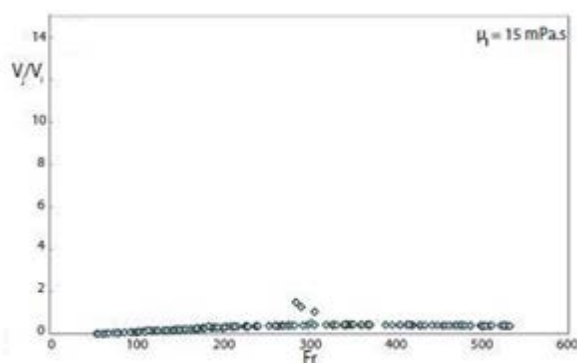
(c)



(d)



(e)



(f)

รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขฟรูดกับอัตราส่วนความเร็วของของเหลวที่มีความหนืดจากน้อยไปมาก (a – f) [3]

การศึกษาการหยดของของเหลวบนผิวของเหลวที่มีอุณหภูมิต่าง ๆ

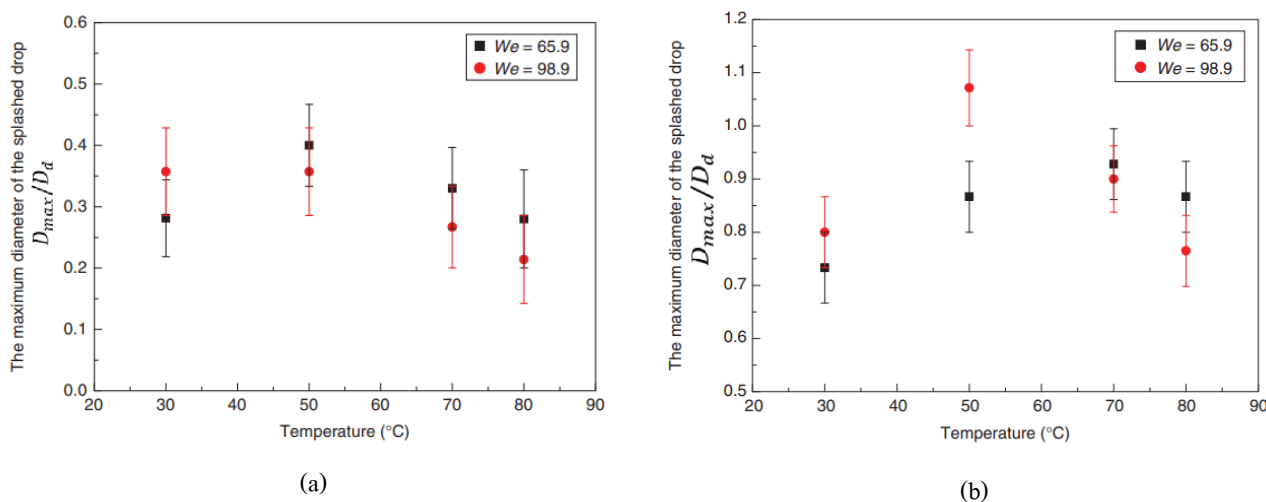
เมื่อกล่าวถึงผลจากความหนืดที่มีต่อการสะท้อนของหยดของเหลวแล้ว ผู้อ่านบางท่านอาจมีข้อสงสัยเช่นเดียวกับผู้เขียนว่า ถ้าทดลองหยดของเหลวให้ตกกระทบลงบนพื้นผิวของเหลวที่มีอุณหภูมิต่าง ๆ กัน จะส่งผลต่อการสะท้อนของของเหลวอย่างไร ผู้เขียนได้ค้นคว้าเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่ได้พบบทความวิจัยของ หวางและคณะ (Xi-Shi Wang, Xiang-Di Zhao, Yi Zhang, Xin Cai, Rui Gu and Hong-Li Xu) ที่รายงานไว้ในวารสาร Journal of Fire Science เมื่อปี ค.ศ. 2009 [6] ในงานวิจัยนี้นักวิจัยได้จัดอุปกรณ์ทดลองคล้ายคลึงกับทีมของมิซง แต่แตกต่างกันที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำตอนเริ่มต้นที่มีขนาดประมาณ 2.4 mm (เล็กกว่าของทีมมิซงประมาณ 0.3 mm) ของเหลวที่จะถูกตกกระทบด้วยหยดน้ำนั้นเป็นเชื้อเพลิงที่บรรจุอยู่ในภาชนะรูปทรงกระบอกที่พื้นที่หน้าตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm และสำหรับระยะระหว่างหยดน้ำกับผิวของเหลว นั้น นักวิจัยได้จัดตำแหน่งให้น้ำหยดโดยใช้เวลา 2 ms ในการตกถึงผิวของเหลวเชื้อเพลิง

ในงานวิจัยนี้ ทีมของหวางได้พิจารณาเลขเวเบอร์ (Weber number, We) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 5

$$We = \frac{\rho_d v_i^2 D_d}{\sigma_d} \quad (5)$$

เมื่อ ρ_d และ σ_d คือความหนาแน่นและความตึงผิวของหยดน้ำ

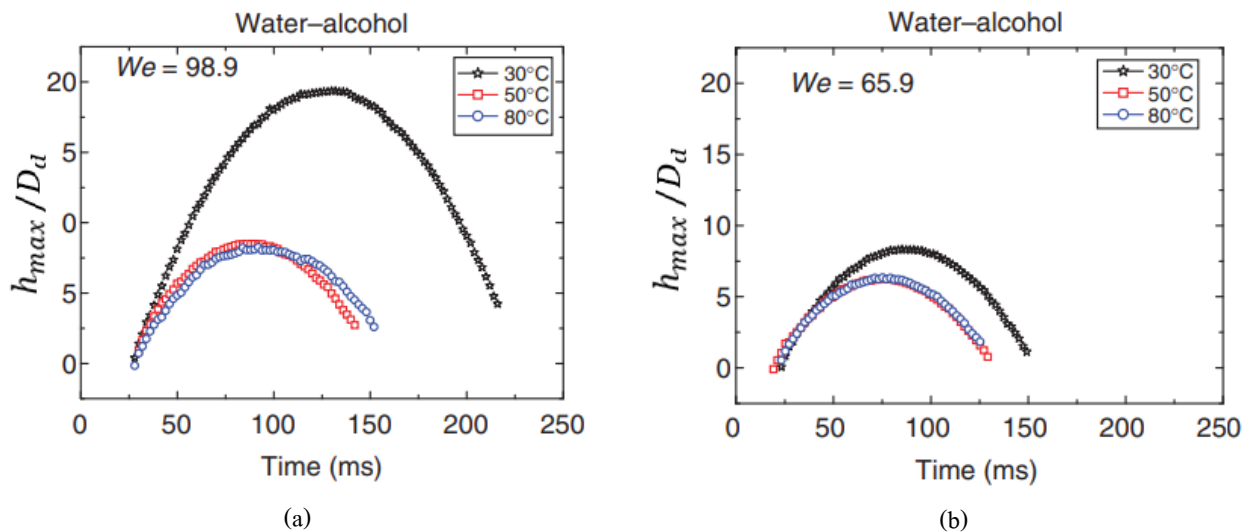
จากการศึกษาขนาดของส่วนของหยดน้ำที่แยกออกมาจากเจ็ต ซึ่งเรียกส่วนของหยดน้ำที่แยกออกมาว่า “สเปคซ์” ได้ผลการทดลองตามกราฟในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ขนาดของสเปคซ์ จากการตกของหยดน้ำบนของผิวเหลวเชื้อเพลิง (a) เคโรซีน และ (b) แอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน [6]

จากรูปที่ 7 ทีมของหวางได้ตั้งข้อสังเกตไว้ว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสเปคซ์ที่โตที่สุด (D_{max}) ในกรณีของเคโรซีนที่มีเลขเวเบอร์ 65.9 และ 98.9 ปรากฏที่อุณหภูมิประมาณ 50°C ส่วนกรณีของแอลกอฮอล์ที่มีเลขเวเบอร์ 98.5 ขนาดของสเปคซ์ที่โตที่สุด ปรากฏที่อุณหภูมิประมาณ 50°C เช่นเดียวกับที่สังเกตได้ในเคโรซีน แต่แอลกอฮอล์ที่มีเลขเวเบอร์ 65.5 ขนาดของสเปคซ์โตที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 70°C และทีมของหวางยังให้ข้อสังเกตว่าหลังจากของเหลวเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดมีอุณหภูมิผ่านค่าที่ให้ขนาดของสเปคซ์สูงสุดแล้ว ขนาดของสเปคซ์จะมีค่าลดลง ทีมวิจัยของหวางได้อธิบายข้อสังเกตนี้ว่าน่าจะเกิดจากการลดลงอย่างรวดเร็วของความหนืดพลวัต (dynamic viscosity) อันเนื่องมาจากอุณหภูมิของของเหลวมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

ทีมของหวางยังได้ศึกษาความสูงที่สเปคซ์สามารถเคลื่อนที่ขึ้นไปได้ ซึ่งได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 8

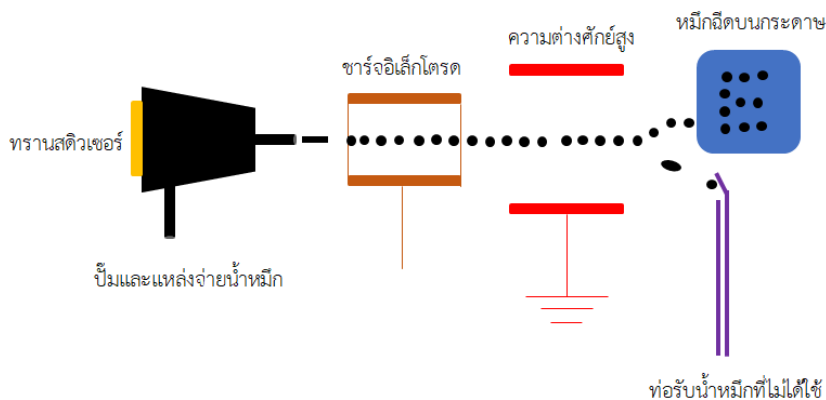


รูปที่ 8 ความสูงของสเปิร์มหลังจากเกิดการสะท้อนของเจ็ทบนผิวของแอลกอฮอล์ ที่เลขเวเบอร์ (a) 98.9 และ (b) 65.9 [6]

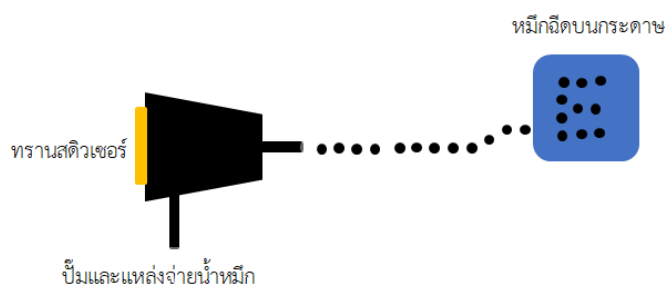
ทีมวิจัยของหวางได้รายงานผลการทดลองตามรูปที่ 8 ไว้ว่า ความสูงมากที่สุดของสเปิร์ม (h_{max}) สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนที่อุณหภูมิของแอลกอฮอล์ประมาณ 30°C แต่ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50°C ขึ้นไป ค่าความสูงมากที่สุดของสเปิร์มจะปรากฏไม่ชัดเจนนัก จากงานวิจัยของหวางสามารถสรุปได้ว่าเลขเวเบอร์และอุณหภูมิของของเหลวส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสเปิร์มและความสูงที่สเปิร์มเคลื่อนที่ขึ้นไปได้นั่นเอง

การประยุกต์ใช้ความรู้จากปรากฏการณ์สะท้อนของหยดของเหลว

ความรู้จากการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์สะท้อนกลับของหยดของเหลวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ในบทความนี้จะนำเสนอการประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท (ink jet) และการสืบสวนในทางนิติวิทยาศาสตร์จากหยดของเหลว การประยุกต์ใช้กับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทที่ใช้ในปัจจุบันมีระบบฉีดหมึก 2 แบบ ได้แก่ แบบฉีดต่อเนื่อง (continuous inkjet, CIJ) และแบบหยดหมึกตามความต้องการ (drop-on-demand, DOD) โดยมีกลไกการฉีดหมึกดังแสดงในรูปที่ 9



(a)



(b)

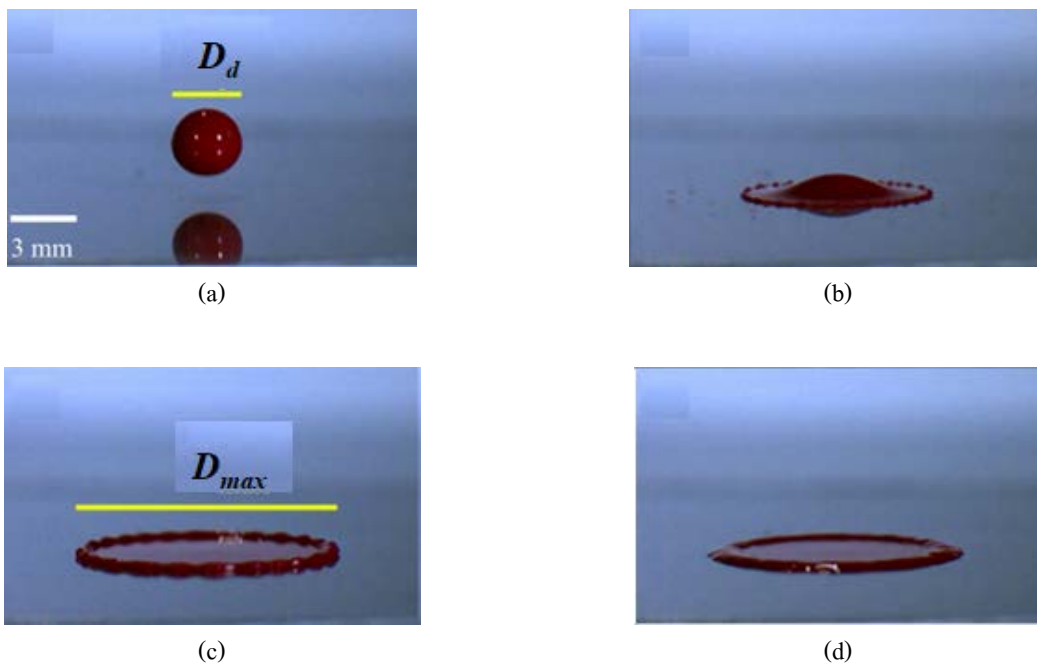
รูปที่ 9 กลไกของหัวพิมพ์อิงค์เจ็ท (a) แบบฉีดต่อเนื่อง และ (b) แบบหยดหมึกตามความต้องการ

ระบบอิงค์เจ็ทแบบ CI ในรูปที่ 9 (a) ใช้หลักการให้ความร้อน (heat pulse) กับน้ำหมึก เมื่อได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอและได้รับการสันสะเทือนจากทรานสดิวเซอร์ น้ำหมึกจะถูกดันออกมาจากแหล่งจ่ายอย่างต่อเนื่อง เมื่อลำของน้ำหมึกที่พุ่งผ่านชาร์จ์อิเล็กทรอนิกส์จะทำให้ลำของน้ำหมึกถูกแยกออกเป็นหยดน้ำหมึกขนาดเล็กลงหลาย ๆ หยด จากนั้นหยดหมึกเหล่านี้จะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นโลหะคู่ขนานที่มีความต่างศักย์สูง การกำหนดค่าความต่างศักย์ที่แตกต่างกันจะเป็นกลไกควบคุมขนาดและการเบนทิศทางของหยดหมึกให้เป็นตามลักษณะอักษรหรือรูปร่างของสิ่งที่ต้องการพิมพ์ ส่วนน้ำหมึกที่ไม่ถูกใช้งานก็จะถูกดักลงไปในตัวเพื่อส่งไปรวมในที่เก็บน้ำหมึกเพื่อนำกลับไปใช้ต่อไป ส่วนระบบอิงค์เจ็ทแบบ DOD หยดน้ำหมึกจะถูกผลิตตามที่ต้องการ ด้วยการใส่แรงดัน (pressure pulse) เข้าไปในแท่นปล่อยน้ำหมึก ผู้พัฒนาจะต้องออกแบบให้ระบบสามารถปรับขนาดของหยดน้ำหมึกให้เหมาะสม และควบคุมความดันที่จะส่งผลกระทบต่อความเร็วของน้ำหมึกที่ถูกปล่อยออกมา [7] จะเห็นได้ว่าการที่จะฉีดน้ำหมึกให้ได้อักษรหรือรูปร่างตามที่ต้องการให้ปรากฏบนสิ่งพิมพ์นั้นผู้สร้างเครื่องพิมพ์จะต้องออกแบบกลไกให้เหมาะสม อาทิเช่น กำหนดขนาดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าและกำหนดแรงดันให้

เหมาะสมสำหรับระบบ CIJ และ DOD ตามลำดับ ใช้น้ำหมึกที่มีความหนืดที่พอดีเพื่อให้สามารถฉีดไปบนสิ่งพิมพ์ได้ตามต้องการ โดยทั่วไปหยดน้ำหมึกที่ฉีดออกมาจากหัวฉีดจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ $84\ \mu\text{m}$ และกระทบกระดาษด้วยอัตราเร็วประมาณ $20\ \text{m/s}$ [8]

การประยุกต์ใช้ความรู้จากการศึกษาการตกกระทบของหยดของเหลวในทางนิติวิทยาศาสตร์ มักให้ความสนใจศึกษาหยดเลือดหรือคราบเลือดที่เกิดขึ้นในคดีฆาตกรรม ผู้เขียนบทความขอยกตัวอย่างงานวิจัยของลานและคณะ (Nick Laan, Karla G. de Bruin, Denis Bartolo, Christophe Josserand และ Daniel Bonn) ที่เขียนไว้ในวารสาร Physical Review Applied เมื่อปี ค.ศ. 2014 [9] ทีมวิจัยนี้ได้นำเสนอสมการที่แสดงความเชื่อมโยงระหว่างขนาดคราบเลือดที่พบบนพื้นผิววัสดุชนิดต่าง ๆ กับตำแหน่งของเหยื่อในคดีฆาตกรรม

ทีมวิจัยของลาน ได้ทดสอบหยดเลือดบนพื้นผิวของวัสดุ 5 ชนิด ได้แก่ แก้ว (glass) สเตนเลสสตีล (stainless steel) แก้วอะคริลิก (acrylic glass) เทรสปา¹ (Trespa) และ โพลีออกซิเมทิลีน (polyoxymethylene) ด้วยอัตราเร็วและมุมตกกระทบ (α) ต่าง ๆ กัน ในรูปที่ 10 ได้แสดงลักษณะของการตกกระทบของหยดเลือดที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 10 ภาพหยดเลือดที่ได้จากการบันทึกด้วยกล้องความเร็วสูง ที่ (a) $0.2\ \text{ms}$, (b) $0.6\ \text{ms}$, (c) $2.4\ \text{ms}$ และ (d) $4\ \text{ms}$ โดยมีอัตราเร็วตกกระทบ $2\ \text{m/s}$ บนพื้นผิวที่เป็นสเตนเลสสตีล [9]

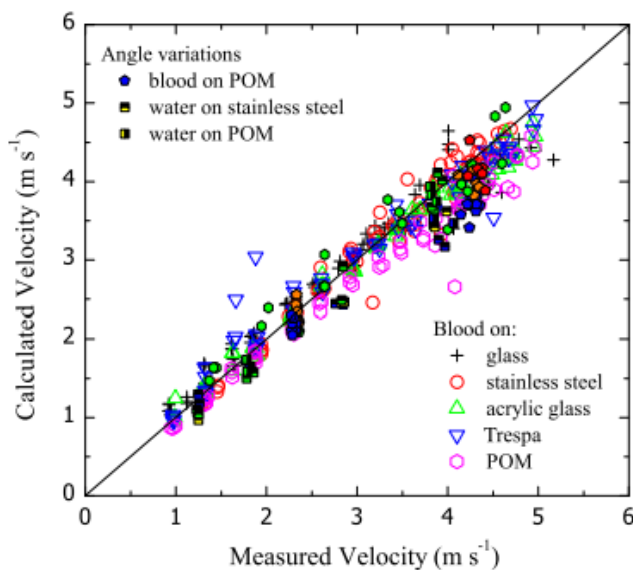
¹ เทรสปา เป็นชื่อเฉพาะของวัสดุที่มีความทนทานต่อความดันสูง

ในการทดสอบทิมวิชัยของลานสังเกตเห็นว่าคราบเลือดที่เกิดหลังจากการตกกระทบบนพื้นผิวใด ๆ มักมีลักษณะเป็นรูปวงรีที่อธิบายขนาดด้วยแกนหลัก (long axis, L_{max}) และแกนรอง (short axis, W_{max}) จากการวิเคราะห์ข้อมูล ทิมวิชัยของลานได้เสนอสมการที่จะนำไปสู่การหาอัตราเร็วตกกระทบของหยดเลือด ดังสมการที่ 6

$$\frac{W_{max}}{D_d} = Re^{1/5} \frac{P^{1/2} \sin \alpha}{[A + P^{1/2} (\sin \alpha)^{4/5}]} \quad (6)$$

เมื่อ Re คือเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) โดย $Re \equiv \frac{\rho D_d v_i}{\mu_l}$, P เป็นพารามิเตอร์ที่แปลงมาจากค่าโมเมนตัมของหยดเลือดที่ตกกระทบ โดย $P = We Re^{-2/5}$ และ A คือค่าคงที่² มีค่าประมาณ 1.24

จากการเปรียบเทียบอัตราเร็วตกกระทบที่ได้จากการวัดค่าจากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 6 พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีผลใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 กราฟแสดงอัตราเร็วตกกระทบที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 6 เทียบกับอัตราเร็วตกกระทบที่วัดได้จากการทดลองในช่วง 0 – 6 m/s ที่มุมตกกระทบ 10° - 90° บนพื้นผิววัสดุต่างชนิดกัน [9]

² ผู้อ่านสามารถศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับที่มาของค่า A ได้จากเอกสารอ้างอิง [9]

ผลการทดสอบถูกต้องของสมการที่ 6 ตามรูปที่ 11 ทำให้ทราบว่าสมการดังกล่าวสามารถคำนวณค่าอัตราเร็วตกกระทบได้ค่อนข้างแม่นยำ ดังนั้นในการสืบสวนคดีฆาตกรรม หากเจ้าหน้าที่พิสูจน์หลักฐานทราบขนาดของคราบเลือดที่ตกบนพื้นผิวใด ๆ ก็สามารถนำไปคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความเร็วตกกระทบของหยดเลือดที่อยู่ในรูปของเลขเรย์โนลด์ เมื่อทราบความเร็วตกกระทบ ก็สามารถคำนวณหาค่าความสูงหรือตำแหน่งเริ่มต้นที่เลือดตกลงมา ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ก็นำไปสู่การคลี่คลายคดีได้ในที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Retrieved January, 28, 2020, from <https://pin.it/ksubmufjr6geyq>.
- [2] Retrieved January, 29, 2020, from <https://m.youtube.com/watch?feature=youtu.be&v=2qK4o3z9guk>.
- [3] G.-J. Michon, C. Josserand and T. Seon, “Jet dynamics post drop impact on a deep pool”, *Physical review fluids* 2, 023601 (2017).
- [4] Retrieved January, 29, 2020, from <https://www.dpreview.com/forums/post/39968354>.
- [5] Retrieved January, 29, 2020, from <https://softfamous.com/tracker/download/>.
- [6] X.-S. Wang, X.-D. Zhao, Y. Zhang, X. Cai, R. Gu and H.-L. Xu, “Experimental study on the interaction of a water drop impacting on hot liquid surfaces”, *Journal of Fire Science*, 27, 545 – 559 (2005).
- [7] Retrieved January, 30, 2020, from http://www.cbe.buffalo.edu/images/people/full_time/furlani/Inkjet 1.png.
- [8] M. Richmond, “Physics of an ink – Jet Printer”, (1999), Retrieved February, 3, 2020, from http://spiff.rit.edu/classes/phys213/lectures/inkjet/inkjet_long.html.
- [9] N. Laan, K. G. de Bruin, D. Bartolo, C. Josserand, and D. Bonn, “Maximum diameter of impacting liquid droplets”, *Physical Review Applied*, 2, 044018 (2014).