Thai Journal of Physics Vol. 37 No. 1 (2020) 1-10

บทความวิชาการ (Article)

การออกแบบกังหันลมแนวแกนตั้งสำหรับความเร็วลมต่ำในประเทศไทย

มนตรี เลื่องชวนนท์[1] และ กิจจา ศรีทองกุล[2]

[1]บัณฑิตวิทยาลัยสหวิทยาการระบบพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

[2]การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เขื่อนรัชชประภา สุราษฎร์ธานี

บทคัดย่อ

พลังงานลมเป็นหนึ่งในพลังงานสะอาด ที่ไม่สร้างมลพิษต่อบรรยากาศของโลก และเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ทั่วไป และมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่ออยู่ในพื้นที่ติดชายทะเลเนื่องจากความต่อเนื่องของกระแสลม ประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตพลังงานลมระดับปานกลาง เพราะต้องอาศัยพลังงานลมที่ความเร็วมากกว่า 3 m/s ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่และความสูงของการติดตั้งกังหัน ดังนั้น จึงมีแนวคิดการออกแบบและสร้างกังหันลมที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่ความเร็วลมต่ำในย่านความเร็ว 2 m/s เพื่อให้สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้ตลอดเวลาและต่อเนื่อง การเลือกใช้กังหันลมแนวแกนตั้งโดยเลือกใช้ ซาโวเนียส (Savonius) และ ดาร์เรียส (Darrieus) เพื่อเพิ่มศักยภาพการหมุนของใบ และสามารถลดความซับซ้อนของชุดกังหันได้มากเมื่อเทียบกับกังหันลมแบบแนวแกนนอน การออกแบบรวมชุดกังหันลมหลายตัวทำงานร่วมกันก็เป็นปัจจัยที่สามารถขยายแนวคิดการผลิตไฟฟ้าจากกังหันแบบเดิม ปัจจุบันระบบอินเวอร์เตอร์ grid tied inverter มีความก้าวหน้ามากสามารถทำงานร่วมกับระบบไฟฟ้าหลัก แบบต่อเนื่อง พร้อมระบบป้องกันไฟฟ้า และส่งข้อมูลการผลิตพลังงานผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ต internet of thing (IOT) ทำให้การออกแบบกังหันลมแนวแกนตั้งมีความทันสมัย สามารถนำไปใช้งานได้จริง

คำสำคัญ: กังหันลมแนวแกนตั้ง, ความเร็วลมต่ำ, อินเตอร์ของสรรพสิ่ง

Abstract

Wind energy is one of the green-power resources that can be environmentally friendly to the atmosphere of the world. The wind current is available on the surface of the earth and is highly efficient in areas of the shore due to continuous wind flow. For wind turbines, Thailand has efficient wind in the middle class at around 3 m/s depending on the area and the height of installation. Therefore, there is a conceptual idea and design for the fabrication of wind turbines that can be operated at low speed (approximately 2 m/s) for the continuous harvesting of wind power. A vertical wind turbine is the best choice, which was selected by Savonius and Darrieus for the blade system. The combination of these blades can increase efficiency and decrease complications when compared to a horizontal wind turbine.

Additionally, the combination of many small vertical wind turbines is a novel technology when compared to a traditional wind turbine. The grid-tied inverter is developed to be continuously operated with main electrical power and high safety, sending data to the internet system (IOT: Internet of things). This design for a vertical wind turbine is a novel system that can realistically be operated for producing electricity.

Keywords: Vertical wind turbine, low speed wind, Internet of things

พลังงานลม เป็นแหล่งพลังงานสะอาดหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นพลังงานจากธรรมชาติโดยตรง มีหลายประเทศที่เร่งพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มกำลังการผลิต เช่น จีน และ อเมริกา สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมได้มากกว่าประเทศอื่นในโลก ประเทศไทยอยู่ในช่วงกำลังพัฒนา การใช้กังหันลมเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า ใน พ.ศ. 2555 ประเทศไทยสามารถผลิตกระแสไฟฟ้า 111.7 MW ด้วยพลังงานลม รัฐบาลไทยได้วางแผนการพัฒนา ใน พ.ศ. 2564 จะสามารถเพิ่มกำลังงานการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทางเลือก 25% ของพลังงานฟอสซิล โดยที่ได้จากพลังงานลม 1,800 MW [1] ประเทศไทยมีพื้นที่อยู่ในตำแหน่งที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร ความเร็วลมจึงอยู่ที่ความเร็วต่ำถึงปานกลางค่าเฉลี่ยประมาณ 3-5 m/s จากการศึกษาศักยภาพลมที่เริ่มต้นตั้งแต่ พ.ศ. 2518 โดยสำนักนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน โดยสร้างแผนที่ความเร็วลม เพื่อให้เหมาะสมกับความติดตั้งกังหัน โดยได้มีการเก็บข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยและทิศทางลม อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดอีกหลายอย่าง ทั้งด้านการวิเคราะห์ และความสูงของเสา พ.ศ. 2544 ประเทศไทย ได้แผนที่ความเร็วลมที่มีศักยภาพเพิ่มมากขึ้น โดยมีข้อมูล ที่ความสูงต่างๆ และข้อมูลที่ละเอียดมากกว่าเดิม ทำให้รู้ว่าประเทศไทยมีพื้นที่เหมาะสำหรับกังหันลมไม่น้อยกว่า class 3 ความเร็วลมประมาณ 6.4-7.0 m/s หรือประมาณ 300-400 kW/m^2 ที่ความสูง 50 m [1]

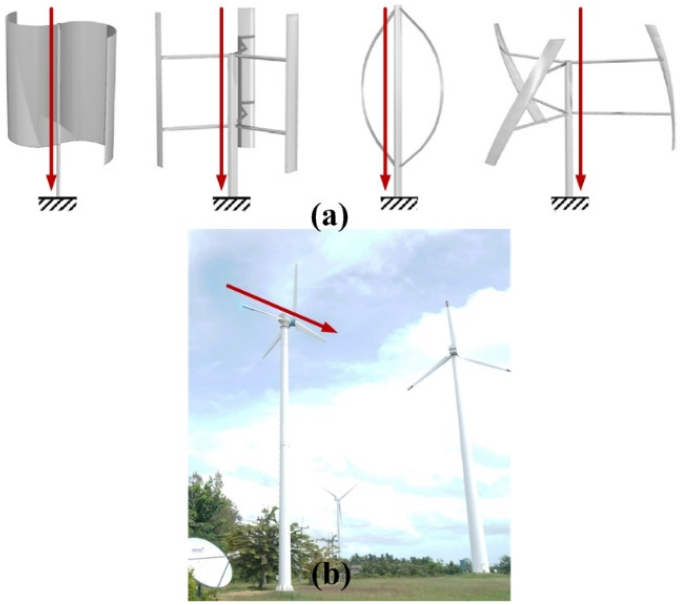
จากข้อมูลยังชี้ให้เห็นว่าบริเวณชายฝั่งอ่าวไทยมีศักยภาพลมที่ดีมาก โดยเฉพาะภาคใต้ตอนบน ในจังหวัดนครศรีธรรมราช และสงขลา 4.4-8 m/s ที่ความสูง 50 m ในขณะเดียวกัน World Bank ได้ประเมินพลังงานลมในแต่ละประเทศในพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น กัมพูชา ลาว ไทย และเวียดนาม [2] จากรายงานความสามารถกำลังลม ประเทศไทยเหมาะสมกับกังหันลมขนาดเล็กที่ความสูง 30 m ในขณะที่กังหันลมขนาดใหญ่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่ความความเร็วลมมาก และความสูงที่ 65 m ดังนั้นกังหันลมขนาดใหญ่มีศักยภาพเหมาะสมกับประเทศเวียดนามมากกว่าประเทศไทย ด้วยเหตุนี้ประเทศไทยจึงเหมาะสมกับกังหันลมความเร็วรอบต่ำถึงปานกลาง

พ.ศ. 2551 ประเทศไทย ติดตั้งอุปกรณ์วัดกำลังลมมาตรฐานบริเวณชายฝั่งภาคใต้ของประเทศ 8 จังหวัด ได้แก่ สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช สงขลา กระบี่ ตรัง สตูล โดยการใช้เซนเซอร์วัดทิศทางและความเร็วลมที่ความสูง 20 m, 30 m และ 40 m [1, 3] และเพิ่มขึ้นที่ความสูง 80 m, 90 m และ 100 m อย่างไรก็ตามจากรายงานชี้ให้เห็นได้ว่าศักยภาพลมจะอยู่ในรัศมีจากจุดวัดประมาณ 15 km และความเร็วลมอยู่ที่ 3.4-9.5 m/s ดังนั้น จากการประเมินด้วยระบบ very small power producers (VSPP) พบว่ากำลังการผลิตของฟาร์มกังหันลมขนาดเล็ก สำหรับการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (WTGs) ขนาด 1.0, 1.5 และ 2.0 MW ได้กำลังการผลิต 1,018 MW, 1,038 MW และ 1,148 MW ตามลำดับ [1]

ประเทศไทยต้องการกังหันลมความเร็วลมต่ำ ลดการซื้อหรือนำเข้าจากต่างประเทศ โดยทั่วไปใช้งานเป็นกังหันแบบแนวแกนนอน ด้วยกังหันลมแบบแนวแกนนอนที่ติดตั้งทั่วไป ในประเทศไทย และในพื้นที่ชายทะเลมีราคาแพงมาก ต้องการการดูแลรักษาซ่อมบำรุงสูง เนื่องจากมีขนาดที่ใหญ่ กลไกที่ซับซ้อน ต้องการความเร็วลมสูง ในขณะที่ กังหันลมแบบแนวตั้ง (vertical axis wind turbine) สามารถออกแบบให้ทำงานที่ความเร็วลมต่ำ มีความซับซ้อนน้อย โดยที่ออกแบบให้มีราคาถูกและง่ายต่อการผลิต ดังนั้น กังหันลมแนวแกนตั้ง สามารถพัฒนาเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความเร็วลมในประเทศไทย

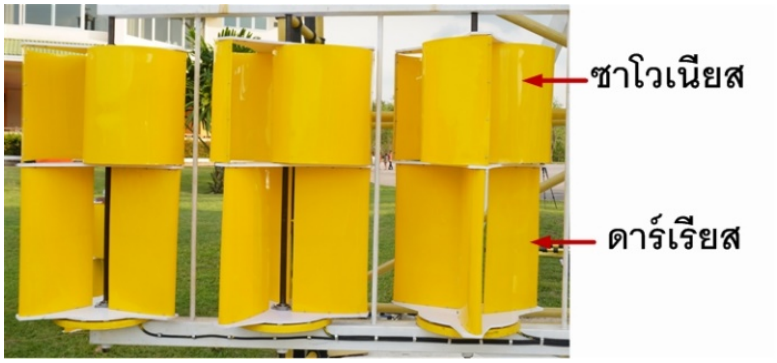
ความแตกต่างระหว่างกังหันแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน

ปัจจุบันกังหันลมสำหรับการผลิตพลังงานมีการแบ่งออกได้หลายรูปแบบ แต่โดยหลักการแบ่งที่ง่ายที่สุดคือ แบบแนวแกนตั้ง (vertical axis wind turbine) และแนวแกนนอน (horizontal axis wind turbine) โดยมีลักษณะการสังเกตคือ แนวแกนการหมุนของกังหันเมื่อแกนหมุนตั้งฉากกับพื้นโลก จัดเป็นกังหันลมแนวแกนตั้ง ในทางกลับกัน ถ้าแกนกังหันลมขนานไปกับพื้นโลก [4] จัดเป็นกังหันลมแนวแกนนอน แสดงดังภาพที่ 1 กังหันลมที่เห็นกันทั่วไปเป็นแบบกังหันลมแนวแกนนอน เป็นระบบใบพัด 3 ใบ รับกระแสลมปะทะโดยตรงกับใบได้ 100% (ทำให้ระบบนี้ ต้องมีระบบ cut-off เพื่อหยุดการหมุนของระบบกังหันเพื่อป้องกันการเสียหาย) เชื่อมต่อโดยตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือผ่านระบบเกียร์เพื่อทดรอบ การหมุน เพื่อแรงบิดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบแบบนี้ ยังต้องมีหางเสือ บังคับการหมุนของชุดกังหัน เพื่อหมุนรับกระลมทุกทิศที่พัดเข้าหา ในขณะเดียวกันก็ต้องมีแบริ่งรองรับการหมุนของชุดกังหันทั้งระบบ อย่างไรก็ตาม เมื่อกังหันลมแนวแกนนอน มีกำลังการผลิตที่สูงมากขึ้นขนาด 1 MW ขึ้นไป ระบบหางเสือหายไป เนื่องจากระบบที่มีขนาดใหญ่มาก การหมุนรับลมด้วยกำลังของกระแสลมให้ประสิทธิภาพที่ไม่ดี และการเริ่มหมุน (cut-in) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่จะยากมากขึ้น [5] ดังนั้น กังหันลมแนวแกนนอนขนาดใหญ่ ต้องหมุนด้วย มอเตอร์ในสภาวะเริ่มต้น ด้วยการรับสัญญาณเริ่มต้นจากเซนเซอร์ความเร็ว และทิศทางของลม ระบบดังกล่าว เป็นระบบขนาดใหญ่ ติดตั้งในประเทศไทย เช่น บริเวณ อำเภอระโนด จังหวัดสงขลา อำเภอหัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช ภาคใต้ของประเทศไทย



รูปที่ 1 *เปรียบเทียบใบกังหันลมแนวแกนตั้ง (a) และแนวแกนนอน (b) [6]*

กังหันลมแนวแกนตั้ง เป็นโครงสร้างที่หมุนตั้งฉากกับพื้นโลก เมื่อลมพัดปะทะใบก็จะหมุน รับกระแสลมได้ทุกทิศทาง แต่กระแสลมที่ปะทะกับใบแค่ 50% เท่านั้น ทำให้มีประสิทธิภาพต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกังหันลมแนวแกนนอน แต่ด้วยไม่ต้องมีหางเสือหมุนรับทิศทางของลม ทำให้กังหันลมแนวแกนตั้งมีระบบการทำงานที่มีซับซ้อนต่ำ กังหันลมแนวแกนตั้งมีการแบ่งตามลักษณะทางกายภาพออกเป็น 2 ชนิด คือ ซาโวเนียส (Savonius) และ ดาร์เรียส (Darrieus) [6] ใบแบบซาโวเนียส มีโครงสร้างกายภาพประกอบด้วยครึ่งวงกลมจำนวน 2 หรือ 3 ชุด ล้อมรอบเพลาแกนกลาง มีข้อดีคือ เริ่มการหมุนที่รวดเร็ว แต่ให้แรงบิด (torque) ที่ต่ำ ดังนั้น ใบแบบซาโวเนียส นิยมนำไปใช้ กับใบพัดของเครื่องวัดความเร็วลม (weather station) ในขณะเดียวกันใบแบบ ดาร์เรียส มีโครงสร้างทางกายภาพเป็นแผ่นใบ (แผ่นใบ อาจเป็นแบบ ปีกเครื่องบิน หรือ เอียงโค้ง) ติดตั้งล้อมรอบ เพลาแกนกลาง ประกอบเป็นกรงกระรอก ข้อดีของระบบใบแบบนี้คือ ให้แรงบิดที่สูง แต่มีข้อเสียคือ การเริ่มหมุนของใบช้า เนื่องจากพื้นที่รับลมที่น้อยกว่า ดังนั้น ในการออกแบบใบกังหันแนวตั้ง จึงมีแนวแกนคิดการรวมใบทั้งสองรูปแบบ ซาโวเนียส และ ดาร์เรียส ทำงานรับลมในชุดเดียวกัน เพื่อดึงเอาศักยภาพของใบทั้ง 2 แบบมาใช้งานให้เริ่มหมุนได้เร็วและมีแรงบิดที่สูง ดังภาพที่ 2



รูปที่ 2 การออกแบบใบกังหันแนวแกนตั้งโดยการรวมกันของใบกังหันแบบ ซาโวเนียสและดาร์เรียส

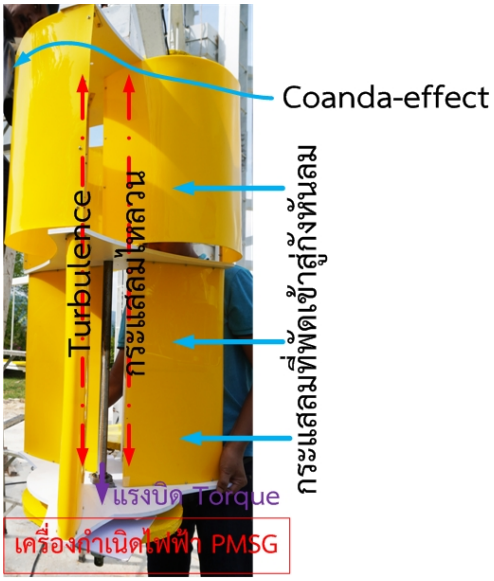
เสากังหันลมแบบแนวแกนตั้ง

กังหันลมแนวแกนนอน เป็นกังหันลมแบบ 3 ใบที่พบเห็นทั่วไป ในประเทศไทย ซึ่งมีขนาดที่ใหญ่และสูง มีราคาแพงมาก และการบำรุงรักษาต้องมีอุปกรณ์มากมาย เช่น รถเครน รถบรรทุก เครื่องมือช่าง บุคคลการที่ต้องมากกว่า 2 คนขึ้นไป เป็นต้น ดังนั้น ในการออกแบบกังหันลมแนวแกนตั้งจึงควรออกแบบให้สามารถแก้ปัญหาข้างต้น โดยมีแนวคิดที่จะทำให้กังหันลมแนวแกนตั้งขนาดเล็กขนาด 320 W ทำงานร่วมกัน ตัวอย่าง เช่น ต้องการกังหันลมขนาด 10 kW จะต้องใช้กังหันลมจำนวน 32 ตัว (320 W × 32 = 10,240 W ≈ 10 kW) ติดตั้งใน 1 ต้นกังหันลม ประกอบด้วยแขนจำนวน 4 ชั้น รองรับชุดกังหันลม ในแต่ละชั้นสามารถควบคุมการขึ้นลงได้โดยการติดตั้งรอกไฟฟ้า เพื่อให้สามารถซ่อมบำรุงได้ง่าย ราคาที่ถูกลง ใช้จำนวนคนในการบำรุงรักษาเพียงแค่ 1-2 คนเท่านั้น เช่น กังหันลมแนวแกนตั้งโครงสร้างแบบต้นไม้ขนาด 10 kW ติดตั้งที่ เขื่อนรัชชประภา จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยที่ออกแบบเป็นลักษณะของกระโดงเรือสูง 13 เมตร ตัวเสาเป็นแท่งเหล็ก (H-beam) ประกอบเป็นแกนเสา 3 เสา ประกอบเป็นแท่งมีพื้นที่ว่างตรงกลาง บรรจุโครงเหล็กหกเหลี่ยมขนาดเล็กมีล้อเคลื่อนที่ภายในร่องของแท่งเหล็ก H-beam ดังนั้น แขนที่รองกับชุดกังหันลม จำนวน 32 ชุด สามารถปรับเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ แสดงดังภาพที่ 3 รองรับการซ่อมบำรุงรักษาที่ไม่ต้องพึ่งพารถเครน ทำให้ลดต้นทุนส่วนนี้ได้ 7,000 บาทต่อครั้ง

รูปที่ 3 การออกแบบเสากังหันลมแนวแกนตั้ง โดยให้แขนที่รองรับชุดกังหันลมสามรถเคลื่อนขึ้นลงได้ทั้ง 4 ชั้น

คุณสมบัติใบกังหันลมและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เป้าหมายของการออกแบบกังหันลมแนวแกนตั้ง โดยการรวมชุดกังหันลมหลาย ๆ ชุดเข้าด้วยกัน คือต้องการให้ทำงานที่ความเร็วลมต่ำ ที่ประมาณ 2 m/s จึงต้องมุ่งแก้ปัญหาที่ 1) การออกแบบใบและเลือกวัสดุใบ 2) การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในส่วนแรกคือ การออกแบบใบและการเลือกวัสดุใบ กล่าวคือ การออกแบบใบเลือกใช้ทั้ง แบบซาโวเนียสและดาร์เรียส ดังภาพที่ 2 เพื่อที่จะได้ข้อดีจากซาโวเนียส คือการออกตัวหมุนที่รวดเร็ว ข้อดีจากดาร์เรียส ที่ให้แรงบิดสูง (high torque) [6] โดยที่ต้องวางซาโวเนียสไว้ด้านบนและดาร์เรียสอยู่ด้านล่าง เป็นรูปแบบที่ดีที่สุดเนื่องจากสามารถลดกระแสไหลวน (turbulence) ในตำแหน่งตรงกลางของใบกังหันลม เมื่อรับกระแสลมที่แรงมากกว่า 2 m/s [7] เนื่องกระแสไหลวนภายในของใบ สามารถลดแรงบิดของใบกังหันแม้ว่าจะมีกระแสลมพัดแรงขึ้นก็ตาม นอกจากนี้ ยังสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์กระแสลมไหลอ้อมผ่านส่วนโค้งของใบ (Coanda-effect) ลดกระแสลมไหลวนในส่วนกลาง [8] และเพิ่มแรงบิดมากขึ้น ในขณะเดียวกันน้ำหนักของใบก็มีผลต้องการออกแบบกังหันลมที่ความเร็วลมต่ำ เนื่องจากการหมุนของกังหันต้องอาศัยกระแสลมสร้างแรงยกด้วยหลักการอากาศพลศาสตร์ ตามลักษณะกายภาพของใบ ก่อให้เกิดแรงบิด แต่ถ้าน้ำหนักของใบมาก ก็จะเป็นภาระหลักในการหมุนเพื่อไปขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ การลดน้ำหนักของใบจึงมีผลต่อการออกแบบกังหันที่ความเร็วลมต่ำ อย่างไรก็ตาม การออกแบบด้วยวัสดุที่เบาอาจจะทำใบขาดความแข็งแรง ในการออกแบบนี้ เป็นอะคริลิค (น้ำหนักโดยรวม 7 kg) เนื่องจากราคาถูกขึ้นรูปง่าย สร้างความสมดุลระหว่างใบได้ดี และมีความแข็งแรงสามารถใช้งานในเวลา 4-6 ปี



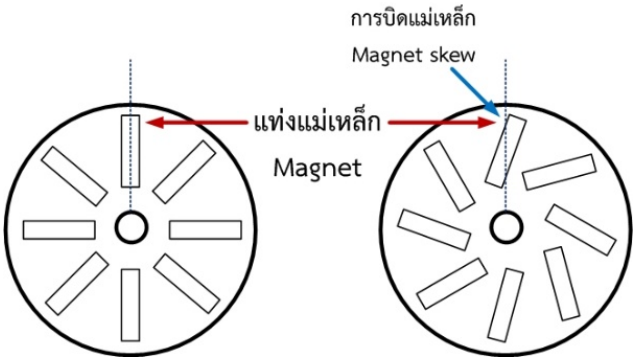
รูปที่ 4 *การเชื่อมต่อชุดกังหันลมแนวแกนตั้งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG*

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็เป็นส่วนสำคัญในการออกแบบเพื่อให้สามารถใช้งานกับความเร็วลมต่ำ เลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรแบบจาน PMSG: permanence magnet synchronous generator ด้วยเหตุผลคือมีความซับซ้อนน้อย ซ่อมบำรุงได้ง่าย สิ่งสำคัญคือจะต้องลดแรงดึงเส้นแรงแม่เหล็กเริ่มต้น starting torque ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการใช้เทคนิคการบิดร่องแม่เหล็ก magnet skew โดยมีหลักการคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบด้วยโรเตอร์ (rotor) มีแท่งแม่เหล็กหลาย ๆ แท่ง ถ้าไม่บิดร่องแม่เหล็ก เส้นแรงแม่เหล็ก (flux) จะสามารถเหนี่ยวนำกับขดลวดได้โดยตรง ไปยังส่วนที่เป็นสเตเตอร์ (stator) ประกอบด้วยขดลวด (coils) ทำให้ขวดลวดเกิดกระแสไฟฟ้าตามหลักการของฟาราเดย์ ตามสมการที่ (1) เมื่อ ε คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ และ d_B คือเส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่านพื้นที่หนึ่ง (A) ถ้าสมมุติว่าพื้นที่ A วางอยู่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ B เส้นแรงแม่เหล็กที่วิ่งผ่านพื้นที่ A มีค่าเท่ากับ $AB\cos\varphi$ โดยที่ φ มุมระหว่างเวกเตอร์พื้นที่ A กับสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ (2) ดังนั้น การบิดร่องแม่เหล็ก คือการเปลี่ยนขนาดพื้นที่ A ของเส้นแรงแม่เหล็ก ที่วิ่งผ่านช่องว่างอากาศ ϕ_g ให้มีขนาดน้อยลงเมื่อหมุนตัดกันระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ ตามสมการที่ (3) [9] ทำให้ลด T_{cog} แรงดึงเส้นแรงแม่เหล็กขณะเริ่มหมุนได้อย่างเหมาะสม กำหนดให้ R คือความต้านทานของเส้นแรงแม่เหล็ก และ θ คือมุมตำแหน่งของโรเตอร์ [9] อย่างไรก็ตาม หลังจากที่ออกแบบใบกังหันและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้ว ควรทดสอบด้วยอุโมงค์ลมแบบเต็มระบบ พร้อมการเชื่อมต่อโหลดไฟฟ้า เพื่อทดสอบแรงลมสามารถหมุนได้ที่ 2 m/s

$$\varepsilon = -\frac{dd_B}{dt} \qquad (1)$$

$$\varepsilon = -\frac{dBA\cos\varphi}{dt} \quad (2)$$

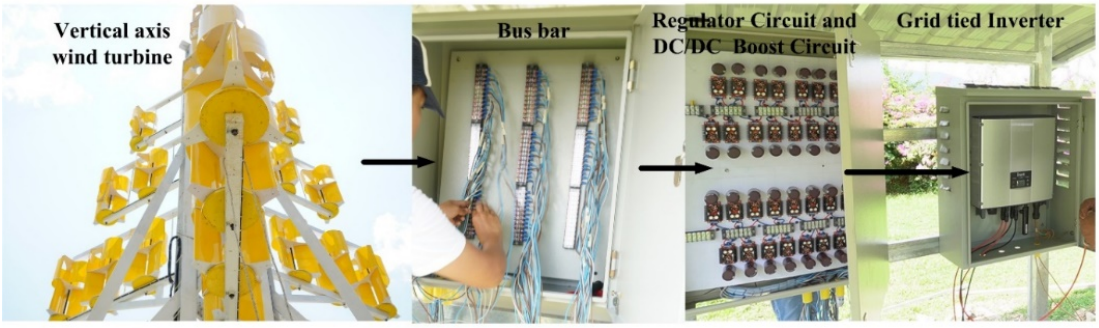
$$T_{cog} = -\frac{1}{2}\emptyset_g^2 \frac{dR}{d\theta} \quad (3)$$



รูปที่ 5 *รูปแบบการบิดแท่งแม่เหล็ก Magnet Skew เพื่อลดแรงบิดเริ่มต้น*

ระบบเครือข่ายการจัดการพลังงานไฟฟ้า

หลังจากที่กังหันลมจำนวน 32 ชุด ทำงานร่วมกัน เมื่อลมพัดเข้าปะทะกังหันลมทำให้ เกิดการหมุนของชุดกังหันแต่ละตัว ส่งกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ จ่ายเข้าระบบเครือข่ายการจัดการพลังงานไฟฟ้า (grid system) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมเป็นระบบ 3 เฟส ระบบกระแสสลับ (AC) เชื่อมต่อกับระบบบัสบาร์ (bus bar) ส่งเข้าระบบเรกูเตอร์ (regulator circuit) เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ AC เป็นกระแสตรง DC แรงดันไฟฟ้าที่ความเร็วลม 2 m/s ผลิตได้กระแสไฟฟ้ากระแสตรง 9.8 V ต่อหนึ่งชุดกังหัน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปรับแรงดันไฟฟ้าเป็น 32 V ด้วยวงจรทวีแรงดัน DC/DC boost circuit เนื่องจากกังหันลมแต่ละชุดหมุนด้วยรอบที่แตกต่างกัน ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็แตกต่างกัน กังหันลมที่ผลิตไฟฟ้าตั้งแต่ 9.8-32 V วงจรทวีแรงดันปรับแรงดันเป็น 32 V ทุกชุดของกังหันลม ด้วยเหตุนี้ แรงดันไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนเป็นกระแสตรง รวมกันอีกครั้ง จ่ายเข้าอินเวอร์เตอร์ (grid tied inverter) เพื่อจ่ายไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้กับบ้านเรือน หรือชาร์จเข้าแบตเตอรี่ แสดงดังภาพที่ 6 อินเวอร์เตอร์ ชนิดที่นำมาใช้งาน สามารถจ่ายไฟฟ้าร่วมกับไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) และเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ต IOT (internet of thing) เพื่อส่งผลการผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ตและโทรศัพท์มือถือ



รูปที่ 6 *ระบบเครือข่ายการจัดการพลังงานไฟฟ้า (grid system)*

อย่างไรก็ตาม ระบบการจัดการไฟฟ้าที่กล่าวมาข้างต้นมีข้อจำกัด กล่าวคือ การทำงานของระบบแปลงไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ เพื่อเชื่อมต่อไปใช้งานกับบ้านเรือน ใช้เวลาในการเริ่มทำงาน (standby mode) ประมาณ 1.40 นาที เป็นอย่างน้อย ดังนั้น เมื่อใดก็ตามที่กระแสลมพัดใช้เวลาต่ำกว่า 1.40 นาที จะไม่มีไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบเลย ด้วยเหตุนี้ กังหันลมต้องการกระแสลมที่ต่อเนื่อง เช่น พื้นที่ชายทะเลจึงเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพสูงในการติดตั้ง ปัญหานี้ มีวิธีการแก้ไข คือ 1) การใช้แบตเตอรี่ชาร์จ เก็บพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมก่อน แล้วจึงจ่ายให้กับ อินเวอร์เตอร์ 2) ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (solar cell) จ่ายไฟฟ้าเข้าอินเวอร์เตอร์เปิดระบบการทำงาน ทำให้พลังงานลมผลิตได้ช่วงไหนก็สามารถจ่ายเข้าอินเวอร์เตอร์ได้เลย ทำให้พลังงานทั้งลมและแสงรวมกัน แต่การแก้ปัญหาแบบนี้ ใช้ได้เฉพาะช่วงกลางวันเท่านั้น

บทสรุป

กังหันลมแนวแกนตั้งเป็นรูปแบบที่ลดความซับซ้อน ประสิทธิภาพอาจจะต่ำกว่าแบบแนวแกนนอน แต่สามารถแก้ได้ด้วยการเลือกใช้แบบผสมประสานระหว่างใบแบบ ซาโวเนียและดาร์เรียสร่วมกันเพื่อให้สามารถเริ่มหมุนได้เร็วและมีแรงบิดสูง วัสดุที่เลือกใช้ควรเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา เพื่อผลิตแรงบิดจากกระแสลม สามารถส่งกำลังงานไปสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG ให้ได้มากที่สุด ไม่ต้องสูญเสียแรงบิดไปกับน้ำหนักของใบกังหันเนื่องน้ำหนักแรงดึงดูดโลก อย่างไรก็ตาม น้ำหนักที่เบาของใบและการออกแบบเพื่อสร้างแรงบิดที่สูง ก็ยังไม่เพียงพอ ต้องพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG ร่วมด้วย โดยการลดแรงดึงเส้นแรงแม่เหล็กเริ่มต้น โดยการใช้เทคนิคการบิดร่องแม่เหล็ก โดยทั่วไปการมุมบิดร่องแม่เหล็ก อยู่ในช่วง 10-30 องศา ขึ้นอยู่กับ จำนวนขั้วแม่เหล็ก จำนวนขดลวด ขนาดของขดลวด จำนวนรอบในการพันขดลวด ความแรงของเส้นแรงแม่เหล็ก ระยะความห่างระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ เป็นต้น เนื่องจากการออกแบบกังหันลมแนวแกนตั้ง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG ประกอบในกังหันลมแต่ละตัวผลิตไฟฟ้าได้ 320 W รวมพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จำนวน 32 ตัว โดยการใช้ระบบอินเวอเตอร์จ่ายไฟฟ้าให้กับบ้านเรือน ซึ่งได้ออกแบบให้ทำงานร่วมกับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ นอกจากนี้ ระบบของอินเวอเตอร์สามารถส่งข้อมูลการผลิตพลังงานเข้าสู่เครือข่ายอินเตอร์และระบบโทรศัพท์มือถือ เสากังหันลมเป็นระบบที่สามารถปรับเคลื่อนขึ้นลงได้ด้วยระบบรอกไฟฟ้า ทำให้ลดการใช้รถเครน สามารถลดค่าใช้จ่ายประมาณ 7,000 บาทต่อการซ่อมบำรุงแต่ละครั้ง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เขื่อนรัชชประภา จังหวัดสุราษฎร์ธานี ผู้สนับสนุนทุนการวิจัย Electricity Generating Authority of Thailand: EGAT (61-F405000-11-IO.SS03F3008347)

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Chingulpitak and S. Wongwises, “Critical review of the current status of wind energy in Thailand”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31, 312-318 (2014).

[2] M. Leiserson, D. Lindauer, O. A. Meesook and P. Suebsaeng, “The World Bank Asia Alternative Energy Program (ASTAE): Status report”,2004

[3] W. Werapun, Y. Tirawanichakul, W. Kongnakorn and J. Waewsak, “An assessment of offshore wind energy potential on Phangan Island by in Southern Thailand”, Energy Procedia, 52, 287-295 (2014).

[4] B. Govind, “Increasing the operational capability of a horizontal axis wind turbine by its integration with a vertical axis wind turbine”, Applied Energy, 199, 479-494 (2017).

[5] X. Wu, Y. Hu, Y. Li, J. Yang, L. Duan, T. Wang, T. Adcock, Z. Jiang, Z. Gao, Z. Lin, A. Borthwick and S. Liao, “Foundations of offshore wind turbines: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 104, 379-393 (2019).

[6] J. Liu, H. Lin and J. Zhang, “Review on the technical perspectives and commercial viability of vertical axis wind turbines”, Ocean Engineering, 182, 608-626 (2019).

[7] M. Mosbahi, A. Ayadi, Y. Chouaibi, Z. Driss and T. Tucciarelli, “Performance study of a Helical Savonius hydrokinetic turbine with a new deflector system design”, Energy Conversion and Management, 194, 55-74 (2019).

[8] A. Garzozi and D. Greenblatt, “A pulsed Coandă-effect reciprocating wind energy generator”, Energy, 150, 965-978 (2018).

[9] L. Dosiek and P. Pillay”, Cogging torque reduction in permanent magnet machines”, IEEE Transactions on Industry Applications, 43, 1565-1571 (2007).

Thai Journal of Physics Vol. 37 No. 1 (2020) 11-19

บทความวิชาการ (Article)

สมการมหัศจรรย์: แบบจำลองโลหะไฮโดรเจน

อุดมศิลป์ ปิ่นสุข

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

เมื่อวันที่ 29 มกราคม พ.ศ. 2563 ที่เพิ่งผ่านมานี้ ลูแบร์และคณะ ได้ประกาศการค้นพบโลหะไฮโดรเจนที่ความดัน 425 GPa โดยผลงานวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Nature ซึ่งเป็นวารสารที่มีชื่อเสียงอย่างมากในวงการวิทยาศาสตร์ของโลก อย่างไรก็ดี วิกเนอร์และฮันติงตัน ได้ทำนายไว้ตั้งแต่ พ.ศ.2478 ว่าไฮโดรเจนสามารถมีสถานะเป็นโลหะได้ ดังนั้น ในบทความนี้เราจะกล่าวถึงแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายการมีอยู่ของโลหะไฮโดรเจนด้วยการวิเคราะห์สมการพลังงานของโครงผลึกและก๊าซอิเล็กตรอน และด้วยความช่วยเหลือของสมการชาชิโยเราสามารถคำนวณหาพลังงานของโลหะไฮโดรเจนที่ความดัน 0 GPa และที่ความดันสูงขึ้นได้

คำสำคัญ: โลหะไฮโดรเจน สมการชาชิโย

Abstract

On January 29th 2020, Loubeyre et al., have published the evidence of metal hydrogen under pressure of 425 GPa in Nature. However, Wigner and Huntington gave theoretical prediction in 1935 that hydrogen can undergo a phase transition into a metal. In this article, we gave a simplified description of the existence of the so-called metallic hydrogen by using a simple energy equation related to the crystal and electron energy terms. With the usage of the celebrated Chachiyo formula, we evaluated the metallic hydrogen ground state energy at 0 GPa and discussed the high pressure phase.

Keywords: Metallic Hydrogen, Chachiyo Formula

อะตอมไฮโดรเจนประกอบโปรตอน 1 ตัวและอิเล็กตรอน 1 ตัว ไฮโดรเจนเป็นสสารที่มนุษย์ตรวจจับได้ที่มีปริมาณมากที่สุดในจักรวาล สำหรับบนโลกนั้น ไฮโดรเจนอยู่ในรูปก๊าซของโมเลกุลและอยู่ในโมเลกุลน้ำและสารประกอบอื่น ๆ ปัจจุบันมีการทดลองนำไฮโดรเจนมาใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับรถยนต์ผ่านทางเซลล์เชื้อเพลิง เพราะมีข้อดีคือผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตพลังงานคือน้ำ ในอนาคตเราอาจได้เห็นรถยนต์พลังงานไฮโดรเจนมีใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างกว้างขวาง ส่วนในบทความนี้จะพิจารณาความเป็นไปได้ที่จะมีโลหะไฮโดรเจน โดย วิกเนอร์และฮันติงตัน [1] ได้ใช้ทฤษฎีควอนตัมทำนายความเป็นไปได้ที่อะตอมของธาตุไฮโดรเจนจะรวมตัวกันเป็นผลึกและมีสมบัติเป็นโลหะไว้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2478 ซึ่งถ้าเกิดได้จริง จะมีประโยชน์อย่างมาก เพราะโลหะไฮโดรเจนมีน้ำหนักเบากว่าเหล็กมากกว่า 50 เท่า เพื่อให้เห็นภาพ ถ้ารถยนต์คันหนึ่งทำจากเหล็กทั้งคันมีน้ำหนัก 1,000 กิโลกรัม ถ้าสร้างจากโลหะไฮโดรเจน รถยนต์คันนี้จะมีน้ำหนักเพียง 20 กิโลกรัมเท่านั้น ในบทความนี้ จะกล่าวถึงแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อแสดงการมีอยู่ของโลหะไฮโดรเจน หลังจากนั้น กล่าวถึงสถานการณ์ล่าสุดของการทดลองค้นหาโลหะไฮโดรเจนในโลกแห่งความเป็นจริง

แบบจำลองโลหะไฮโดรเจน

ในวัสดุควบแน่น (condensed matter) จะมีสมการศูนย์กลาง (central equation) ซึ่งเป็นสมการแบบหลายวัตถุ (many-body equation) ที่ใช้อธิบายอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคทุกตัวที่อยู่ในระบบ ที่สำคัญคือมีเพียงอันตรกิริยาแบบคูลอมบ์ (Coulomb interaction) เท่านั้น สมการศูนย์กลาง [2] เขียนได้ดังนี้

$$\hat{H} = -\sum_I \frac{\hbar^2}{2M_I}\nabla_I^2 + \frac{1}{2}\sum_{I,J}\frac{Z_I Z_J e^2}{|\boldsymbol{R}_I - \boldsymbol{R}_J|} - \sum_{i,I}\frac{Z_I e^2}{|\boldsymbol{R}_I - \boldsymbol{x}_i|} - \frac{\hbar^2}{2m}\sum_i \nabla_i^2 + \frac{1}{2}\sum_{i,j}\frac{e^2}{|\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_j|} \qquad (1)$$

โดย $\boldsymbol{R}_I$ เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่งของนิวเคลียสตัวที่ I และ $\boldsymbol{x}_i$ เป็นเวคเตอร์บอกตำแหน่งของอิเล็กตรอนตัวที่ i และ ส่วน m เป็นมวลของอิเล็กตรอน M เป็นมวลของนิวเคลียส Z เป็นค่าประจุบวกของนิวเคลียส พจน์แรกอธิบายพลังงานจลน์ของนิวเคลียส พจน์ที่สองอธิบายอันตรกิริยาระหว่างเหล่านิวเคลียส พจน์ที่สามอธิบายอันตรกิริยาระหว่างนิวเคลียสกับอิเล็กตรอนของอะตอม พจน์ที่สี่อธิบายพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน และพจน์สุดท้ายอธิบายอันตรกิริยาระหว่างเหล่าอิเล็กตรอนในระบบ

เราสามารถสร้างแบบจำลองโลหะไฮโดรเจนอย่างง่ายได้โดยพิจารณาว่าโลหะไฮโดรเจนประกอบด้วยโปรตอน 1 ตัวเป็นฐาน (basis) ของโครงผลึก นั่นคือ กำหนดให้ $Z = 1$ ในสมการที่ (1) ในขณะที่อิเล็กตรอนนั้นออกมารวมตัวกันเป็นก๊าซอิเล็กตรอนและทำหน้าที่เสมือนกาวที่เชื่อมโครงผลึกเข้าไว้ด้วยกัน กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือโครงผลึกอยู่ในสมดุลระหว่างแรงผลักระหว่างเหล่าโปรตอนและแรงดึงดูดที่มาจากก๊าซอิเล็กตรอน บางครั้งเรียกแรงดึงดูดนี้ว่าพันธะโลหะ และผู้เขียนขอเรียกโลหะที่มีฐานจากอะตอมไฮโดรเจนนี้ว่า “โลหะไฮโดรเจน” ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันความสับสนกับการค้นพบของ เอรีเมทส์และโทรยัน ในปี พ.ศ. 2554 ที่พบว่าโมเลกุลไฮโดรเจนและดิวทีเรียมก็มีสมบัติเป็นโลหะเหลวภายใต้ความดันสูงประมาณ 260-270 GPa [3] แต่เราไม่ได้พิจารณาโลหะเหลวในที่นี้

ในบทความนี้ เราจะไม่ได้แก้สมการควอนตัมของสมการที่ (1) โดยตรง แต่จะประมาณพลังงานในแต่ละเทอมเป็นฟังก์ชันของ r_s ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บอกรัศมีของทรงกลมสมมติอันหนึ่งที่มีปริมาตรเพียงพอที่จะบรรจุก๊าซอิเล็กตรอนที่มีประจุรวมเท่ากับอิเล็กตรอน

หนึ่งตัว หรืออีกนัยหนึ่งคือความหนาแน่นของก๊าซอิเล็กตรอนจะมีค่าเท่ากับ $\rho = 1/\left(\frac{4}{3}\pi r_s^3\right)$ และเรียกทรงกลมสมมตินี้ว่า เซลล์ของวิกเนอร์-ไซส์ (Wigner-Seitz cell) [1,2] ในแบบจำลองโลหะไฮโดรเจนที่กำลังพิจารณานี้เราจะกำหนดให้โปรตอน 1 ตัวอยู่ที่ศูนย์กลางของเซลล์พอดี ดังนั้นเซลล์หนึ่ง ๆ จะมีความเป็นกลางทางไฟฟ้าและจะไม่มีอันตรกิริยากับเซลล์อื่น ๆ ข้อกำหนดนี้ทำให้เราสามารถละทิ้งพจน์ที่สองของสมการที่ (1) ได้ และถ้าเราสมมติว่าการคำนวณนี้ใช้กับระบบที่มีอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ (0 K) นิวเคลียสของระบบจะตรึงอยู่กับที่ในโครงผลึก จะทำให้พจน์แรกของสมการที่ (1) ซึ่งอธิบายพลังงานจลน์ของนิวเคลียสนั้นสามารถละทิ้งได้เช่นกัน ดังนั้นแบบจำลองของเราจะพิจารณาเพียงพลังงานจากอันตรกิริยาแบบคูลอมบ์จากพจน์ที่สามและห้าของสมการที่ (1) ซึ่งคำนวณได้จากพลังงานเมดาลุง (Medalung energy) [2,4] ส่วนพลังงานของพจน์สี่และห้าของสมการที่ (1) สามารถประมาณได้ด้วยพลังงานของก๊าซอิเล็กตรอนและสมการชาชิโย [5,6] ดังนั้นพลังงานเฉลี่ยต่อเซลล์ (หรือต่ออิเล็กตรอน) จึงเหลือเพียง [2,4]

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_M + \bar{\varepsilon}_k + \bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_c \tag{2}$$

การประมาณด้วยเซลล์ของวิกเนอร์-ไซส์เป็นหนึ่งในวิธีการการลดองศาความอิสระ (degree of freedom) ของสมการที่ (1) เพื่อให้การคำนวณอยู่ในพิสัยที่ทำได้ง่าย การประมาณอีกวิธีที่ใช้กับกรณีทั่วไปโดยเฉพาะเมื่อมีโครงผลึกเข้ามาเกี่ยวข้องคือการประมาณแบบอะเดียบาติกของบอร์น-ออฟเพนไฮเมอร์ (Born-Oppenheimer adiabatic approximation) [7] เริ่มต้นด้วยการแยกพิจารณาสมการที่เกี่ยวข้องกับนิวเคลียส (พจน์ที่หนึ่งและสองของสมการที่ (1)) และกับอิเล็กตรอน (พจน์ที่สาม สี่ และห้าของสมการที่ (1)) ออกจากกัน เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสนั้นช้ามากเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นผลจากขนาดของมวลที่ต่างกันมาก ๆ แสดงว่าการคำนวณตามสมการที่ (2) คือการพิจารณาเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ผู้อ่านสามารถเพิ่มเติมความละเอียดได้ในหลายส่วน เช่น การใช้เซลล์ที่มีสมมาตรตามโครงผลึกแทนการใช้เซลล์ของวิกเนอร์-ไซส์ หรือ การรวมผลของพลศาสตร์ของโปรตอนตามที่ปรากฏในพจน์ที่หนึ่งและสองของสมการที่ (1) เข้ามาในสมการด้วยก็ได้ ซึ่งผลการทดลองของลูแบร์และคณะ [8] ก็สนับสนุนแนวทางนี้ และนอกจากนี้ สไตเออร์และแอชครอฟท์ [4] ได้เสนอแนวทางปรับปรุงความถูกต้องของสมการที่ (2) โดยการเติมพจน์ที่มีลำดับสูงขึ้น (higher order terms) ในทฤษฎีการตอบสนอง (response theory) แต่พจน์ที่เพิ่มขึ้นเหล่านี้นั้นมีการคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อน ผู้เขียนจึงขอละไว้ในที่นี้

ต่อมาคือการพิจารณาพจน์ต่างๆ ของสมการที่ (2) โดยพจน์แรก คือ $\bar{\varepsilon}_M$ เป็นพลังงานเมดาลุงมาจากการที่มีโปรตอนที่มีประจุบวก $Z = 1$ อยู่ที่ศูนย์กลางของเซลล์และโปรตอนนี้มีอันตรกิริยาแบบคูลอมบ์กับอิเล็กตรอน และได้รวมผลของอันตรกิริยาแบบคูลอมบ์ของก๊าซอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอภายในเซลล์ไว้ด้วย ในความเป็นจริงแล้ว พลังงานเมดาลุงนี้ขึ้นกับรูปร่างและสมมาตรของโครงผลึก แต่ผลลัพธ์กลับมีความสัมพันธ์ที่เรียบง่ายดังนี้

$$\bar{\varepsilon}_M = -\frac{\alpha}{r_s} \tag{3}$$

โดยค่า α เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับโครงผลึกตามที่สรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ α สำหรับ $\bar{\varepsilon}_M$ ในโครงผลึกชนิดต่าง ๆ [2]

โครงผลึก	α
วิกเนอร์-ไซส์	1.8
Simple cubic	1.760
Body-centered cubic	1.79186
Face-centered cubic	1.79175
Hexagonal close-packed	1.79168

พจน์ที่สองคือ $\bar{\varepsilon}_k$ เป็นพลังงานจลน์เฉลี่ยของก๊าซอิเล็กตรอน และสำหรับก๊าซอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอจะได้ว่า

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{N}\sum_{\boldsymbol{k}}^{\boldsymbol{k_F}} \varepsilon_{\boldsymbol{k}} = \frac{2.21}{r_s^2} \tag{4}$$

พจน์ที่สามคือ $\bar{\varepsilon}_x$ เป็นพลังงานแลกเปลี่ยนเฉลี่ยของก๊าซอิเล็กตรอนเนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นเฟอร์มิออน ถ้าให้ $y = \frac{k}{k_F}$ จะได้ว่า

$$\bar{\varepsilon}_x = -\frac{1}{2N}\frac{e^2 k_F}{\pi}\sum_{\boldsymbol{k}}^{\boldsymbol{k_F}}\left(1 + \frac{1-y^2}{2y}\ln\left|\frac{1+y}{1-y}\right|\right) = -\frac{0.916}{r_s} \tag{5}$$

และพจน์สุดท้ายคือ $\bar{\varepsilon}_c$ เป็นพลังงานสหสัมพันธ์เฉลี่ยของก๊าซอิเล็กตรอน ซึ่งเราสามารถใช้สมการชาชิโย [5,6] ได้ทันที

$$\bar{\varepsilon}_c = A\ \log(1 + \frac{B}{r_s} + \frac{C}{r_s^2}) \tag{6}$$

ดังนั้นพลังงานรวมเฉลี่ยของแบบจำลองโลหะไฮโดรเจนอย่างง่ายของเราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันของ r_s ได้ดังนี้

$$\bar{\varepsilon} = -\frac{1.8}{r_s} + \frac{2.21}{r_s^2} - \frac{0.916}{r_s} - 0.0311\ \log(1 + \frac{20.4562}{r_s} + \frac{20.4562}{r_s^2}) \tag{7}$$

สมการนี้สำหรับโครงผลึกแบบเซลล์ของวิกเนอร์-ไซส์ และจุดที่เสถียรที่สุดนั้นมีพลังงานต่ำสุด ซึ่งก็คือจุดที่ $\frac{d\bar{\varepsilon}}{dr_s} = 0$ ที่จุดนี้มีค่า $r_s^0 = 1.590a_0$ และ $\bar{\varepsilon}^0 = -0.930Ry$ โดย a_0 เป็นรัศมีของบอห์ร (Bohr radius) และพลังงานอยู่ในหน่วยริดเบิร์ก (Rydberg, 1Ry =

13.6eV) การคำนวณตามสมการนี้เป็นการประมาณอย่างง่ายที่สุด การคำนวณของ วิกเนอร์และฮันติงตัน [1] พบว่า $r_s^0 = 1.64a_0$ และ $\bar{\varepsilon}^0 = -1.05Ry$ ซึ่งสอดคล้องกับวิธีแบบมอนติคาร์โลที่กำหนดให้โปรตอนเป็นจุดตรึง โดย เซปเพอลีย์และอัลเดอร์ [9] ที่ได้ $r_s^0 = 1.61a_0$ และ $\bar{\varepsilon}^0 = -1.053Ry$ วิธีแบบมอนติคาร์โลนั้นใช้หาผลเฉลยของสมการที่ (1) โดยตรงจึงถือว่ามีความแม่นยำที่สุด สาเหตุของความคลาดเคลื่อนของสมการที่ (7) นั้นมีหลายประเด็นตามที่ได้กล่าวไปแล้ว แต่ส่วนสำคัญอันหนึ่งมาจากการที่เราใช้ค่าพลังงานจลน์โดยประมาณจากพลังงานจลน์ของก๊าซอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ แต่ในความเป็นจริงแล้วพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนยังขึ้นกับรูปร่างของฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนในโครงผลึกด้วย เพราะอิเล็กตรอนมีแนวโน้มจะเข้าไปอยู่ใกล้โปรตอนมากกว่าที่อื่น ๆ ดังนั้นการประมาณที่ดีกว่าคือการแก้สมการหาฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนด้วยเงื่อนไขขอบเขตที่ตรงกับความเป็นจริงมากขึ้น และรวมผลรูปร่างของฟังก์ชันคลื่นเข้ามาในการคำนวณพลังงานเฉลี่ยด้วย ผู้ที่เสนอปรับปรุงค่าพลังงานนี้คือ สไตเออร์และแอชครอฟท์ [4] จากนั้น นพปฎล สุทธิศิริ ศาสตราจารย์ ดร.วิชิต ศรีตระกูล และ ศาสตราจารย์ ดร.วิรุฬห์ สายคณิต [10] รวมถึง รองศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ มูลตระกูล และผู้เขียน [11] ก็เคยเสนอแนวทางในการปรับปรุงสมการพลังงานด้วยวิธีนี้ด้วย ค่าที่ได้จากการปรับปรุงทั้งหมดสรุปไว้ในตารางที่ 2 อย่างไรก็ตาม ข้อมูลตามตารางแสดงให้เห็นว่าโมเลกุลไฮโดรเจนนั้นมีพลังงานต่ำที่สุด จึงสรุปได้ว่าโมเลกุลไฮโดรเจนมีเสถียรภาพเชิงพลังงานที่ดีกว่าโลหะไฮโดรเจน หรืออีกนัยหนึ่งคือเราอาจไม่พบโลหะไฮโดรเจนในสภาวะปกติ

ตารางที่ 2 สรุปผลการคำนวณ r_s^0 และ $\bar{\varepsilon}^0$ ด้วยวิธีต่าง ๆ

ผู้คำนวณ	$r_s^0(a_0)$	$\bar{\varepsilon}^0(Ry)$	วิธีการ
ผู้เขียน	1.590	-0.930	สมการที่ (7)
วิกเนอร์และฮันติงตัน [1]	1.64	-1.05	เซลล์ของวิกเนอร์-ไซส์
สไตเออร์และแอชครอฟท์ [4]	1.61	-1.038	ฟังก์ชันคลื่นและเงื่อนไขขอบเขต
ไพโรจน์และอุดมศิลป์ [11]	1.6	-1.07	ฟังก์ชันคลื่นและเงื่อนไขขอบเขต
เซปเพอลีย์และอัลเดอร์ [9]	1.61	-1.053	มอนติคาร์โล
อะตอมไฮโดรเจน	-	-1.0	ฟังก์ชันคลื่น
โมเลกุลไฮโดรเจน [12]	-	-1.164	การทดลอง

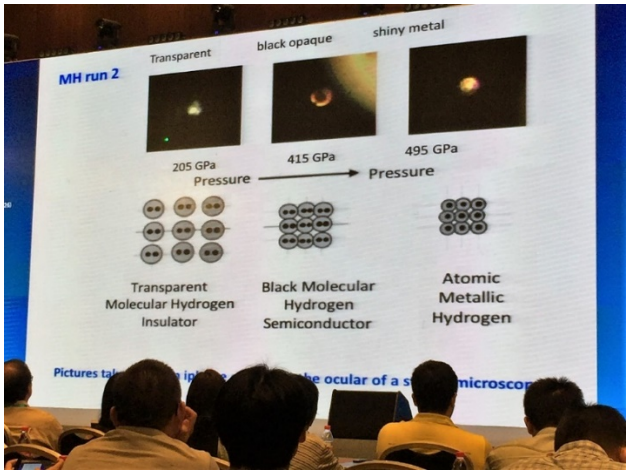
เมื่อเราทราบสมการพลังงานแล้วเราสามารถคำนวณหาความดันได้จากความสัมพันธ์ $P = -\frac{d\bar{\varepsilon}}{dV}$ โดย $V = \frac{4}{3}\pi r_s^3$ ดังนั้น ค่าพลังงานที่ระบุในตารางที่ 2 จึงเป็นค่าที่ความดันเป็นศูนย์ ซึ่งสรุปได้ว่าอาจไม่พบโลหะไฮโดรเจนที่ผิวโลกหรือระดับน้ำทะเล อย่างไรก็ดี แม้โลหะไฮโดรเจนจะมีเสถียรภาพเชิงพลังงานต่ำกว่าโมเลกุลไฮโดรเจนที่ความดัน 0 GPa แต่นักทดลองเริ่มมีหลักฐานมากขึ้นว่า โลหะไฮโดรเจนน่าจะมีความเสถียรที่ความดันสูง ยกตัวอย่างเช่น ในปี พ.ศ. 2560 ดิแอสและซิลเวรา (Dias and Silvera) [13] ได้ทำการทดลองหาสถานะต่าง ๆ ของไฮโดรเจนที่ความดันสูง โดยทั้งคู่ได้ทำการวัดสมบัติทางแสงและพลังงานของอนุภาคพลาสมอน และ ณ ความดันที่คาดว่าจะเกิดโลหะไฮโดรเจน พบว่าความถี่พลาสมอนมีค่าประมาณ 32.5 - 33.2 eV เทียบได้กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนประมาณ

7.7 - 8.1×10^{23} อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือเทียบได้กับ $r_s \approx 1.26 - 1.34a_0$ [13] ถ้าหากเลือกค่ากลาง เช่น $r_s \approx 1.305a_0$ และใส่แบบจำลองตามสมการที่ (7) ของเรา จะให้ค่าความดันประมาณ 496 GPa ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ 495 GPa ที่ ดิแอสและซิลเวรา รายงานไว้อย่างมาก แบบจำลองอย่างง่ายของเรานั้นก็สามารถจับใจความสำคัญของโลหะไฮโดรเจนได้ดีพอควร

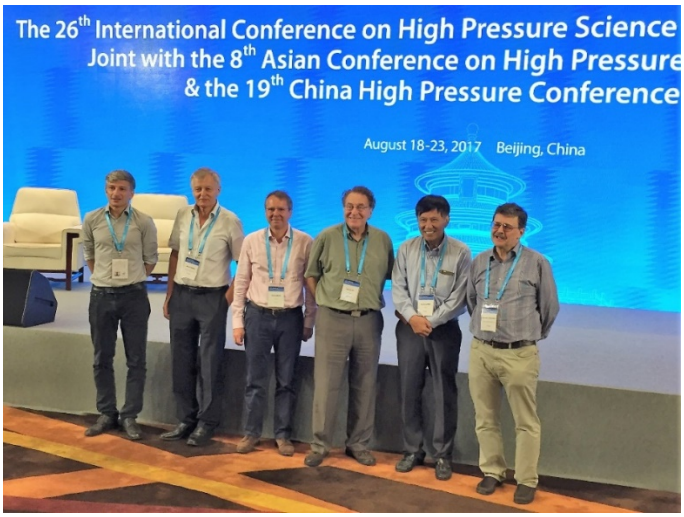
ความท้าทายของการค้นหาโลหะไฮโดรเจน

จากที่ วิกเนอร์และฮันติงตัน [1] ได้ใช้ทฤษฎีควอนตัมทำนายความเป็นไปได้ที่อะตอมของธาตุไฮโดรเจนจะรวมตัวกันเป็นผลึกและมีสมบัติเป็นโลหะไว้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2478 หลังจากที่ชโรดิงเจอร์ได้รับรางวัลโนเบลจากหัวข้อ "for the discovery of new productive forms of atomic theory" ร่วมกับดิแรกเพียง 2 ปี การทำนายนี้ได้กระตุ้นให้นักทดลองทำการค้นคว้าหาสถานะโลหะของธาตุไฮโดรเจนกันอย่างกว้างขวาง แต่เวลาผ่านไปเกือบ 80 ปีก็ยังไม่มีผู้ใดประกาศการค้นพบโลหะไฮโดรเจนที่มีโครงผลึกที่มีฐาน (basis) จากอะตอมไฮโดรเจน จนกระทั่งเมื่อไม่นานนี้ การทดลองโดย ดิแอสและซิลเวรา (Dias and Silvera) [13] ในปี พ.ศ. 2560 พบว่าต้องทำการทดลองที่ความดันสูงถึง 495 GPa เพื่อสังเคราะห์โลหะไฮโดรเจน (ความดันอากาศที่ระดับน้ำทะเลประมาณ 10^5 Pa ความดันที่แก่นโลกประมาณ 350 GPa สูงกว่าที่ระดับน้ำทะเลหลายล้านเท่า) งานวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Science และนอกจากนี้ ซิลเวรา ยังได้ประกาศผลงานวิจัยการค้นพบโลหะไฮโดรเจนในการประชุมวิชาการ 8th Asian Conference in High Pressure Research (ACHPR) ณ กรุงปักกิ่ง ประเทศจีน เมื่อวันที่ 18 เมษายน พ.ศ. 2560 ตามรูปที่ 1 และ 2 โดยผู้เขียนมีโอกาสเข้าร่วมประชุมด้วยในฐานะเลขานุการของกลุ่ม ACHPR และได้บันทึกภาพไว้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของดิแอสและซิลเวรานั้นได้รับการวิพากย์อย่างเข้มข้นถึงความน่าเชื่อถือในการวัดความดันและสมบัติของตัวอย่างการทดลอง [14] พวกเขาได้เคลื่อนย้ายตัวอย่างเพื่อไปทำการทดสอบเพิ่มเติม แต่เกิดอุบัติเหตุทำให้ “ว่าที่โลหะไฮโดรเจน” ชิ้นแรกของโลกหล่นหายไป [15]

ล่าสุดเมื่อวันที่ 29 มกราคม พ.ศ. 2563 ลูแบร์และคณะ [8] ได้ประกาศการค้นพบโลหะไฮโดรเจนที่ความดัน 425 GPa ผลงานวิจัยได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Nature การทดลองของพวกเขาได้มีการประมาณค่าช่องว่างแถบพลังงาน (bandgap) จากสมบัติทางแสงของของแข็ง และพบว่าของแข็งไฮโดรเจนที่ความดันไม่ถึง 425 GPa นั้นเป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงานลดลงเรื่อยๆ ตามความดันที่เพิ่มขึ้น ผลการทดลองของลูแบร์และคณะยังสนับสนุนทฤษฎีที่รวมผลควอนตัมของนิวเคลียส (Quantum nuclear effects) (นั่นคือผลทางควอนตัมของพจน์ที่หนึ่งและสองของสมการที่ (1) นั้นละทิ้งไม่ได้) และแรงแวนเดอร์วาลส์ (van Der Waals) มีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมของช่องว่างแถบพลังงานภายใต้ความดันเป็นอย่างมาก เมื่อการทดลองเพิ่มความดันจนถึงจุดเปลี่ยนสถานะ (phase transition) ของแข็งไฮโดรเจนมีการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกและช่องว่างพลังงานลดลงอย่างฉับพลันจนกลายเป็นศูนย์ และพบว่าความดันที่จุดเปลี่ยนสถานะมีค่าประมาณ 425 GPa อย่างไรก็ดี ค่าความดันที่จุดเปลี่ยนสถานะนั้นต่างจากของ ดิแอสและซิลเวรา [13] พอสมควร ซิลเวราจึงออกมาวิพากย์ความน่าเชื่อถือของการวัดอย่างเข้มข้น ซึ่งก็อาจเป็นเพราะ ลูแบร์และคณะ เคยวิพากย์ผลงานของ ดิแอสและซิลเวรา อย่างเข้มข้นเช่นกัน [16]



รูปที่ 1 *ภาพจากสไลด์ของซิลเวราในงานประชุม 8th ACHPR วันที่ 18 เมษายน พ.ศ. 2560 แสดงภาพสถานะต่าง ๆ ของไฮโดรเจนจากการทดลองโดยมีภาพโลหะไฮโดรเจนอยู่ทางขวามือสุด*



รูปที่ 2 *ซิลเวราได้ประกาศการค้นพบโลหะไฮโดรเจนในงานประชุม 8th ACHPR ณ กรุงปักกิ่ง ประเทศจีน เมื่อวันที่ 18 เมษายน พ.ศ. 2560 โดยมีนักฟิสิกส์ทดลองที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแผนผังสถานะ (phase diagram) ของไฮโดรเจนภายใต้ความดันสูงเข้าร่วมการประชุมหลายท่าน ได้แก่ (จากซ้าย) เกรกอเรียนซ์ (E. Gregoryanz) เอรีเมทส์ (M. Eremets) ลูแบร์ (P. Loubeyre) ซิลเวรา (I.F. Silvera) เหมา (H.-K. Mao) และ กอนชารอฟ (A.F. Goncharov)*

อีกแหล่งหนึ่งที่คาดว่าจะมีโลหะไฮโดรเจนคือดาวพฤหัส (Jupiter) ในรอบกว่า 40 ปีที่ผ่านมา นาซ่า (NASA) ได้ส่งยานอวกาศเพื่อไปสำรวจดาวพฤหัสแล้วหลายลำ ยกตัวอย่างเช่น ยานอวกาศไพโอเนียร์ 10 และ 11 เดินทางถึงดาวพฤหัสในปี พ.ศ. 2516 ยานอวกาศวอยเอเจอร์ 1 และ 2 เดินทางถึงในปี พ.ศ. 2522 ยานอวกาศกาลิเลโอ เดินทางถึงเมื่อปี พ.ศ. 2538 และล่าสุด ยานอวกาศจูโน่ (JUNO) เดินทางถึงดาวพฤหัสเมื่อปี พ.ศ. 2559 และกำลังสำรวจดาวพฤหัสอยู่ ณ ปัจจุบัน จากข้อมูลที่ยานอวกาศเหล่านี้ส่งกลับมายังโลก นักวิทยาศาสตร์ค้นพบว่าสนามแม่เหล็กของดาวพฤหัสมีความแรงกว่าสนามแม่เหล็กของโลก 20 เท่า มีโมเมนต์แม่เหล็กแรงกว่าของโลกถึงกว่า 20,000 เท่า ทั้งที่องค์ประกอบส่วนใหญ่ของดาวนั้นมาจากไฮโดรเจนและฮีเลียม นักวิทยาศาสตร์ยังได้ค้นพบปรากฏการณ์ออโรร่า (Aurora) บนดาวพฤหัสซึ่งเกิดจากอนุภาคที่มีประจุมีอันตรกิริยากับสนามแม่เหล็กของดาวซึ่งเป็นเครื่องยืนยันอีกอันหนึ่งว่าดาวพฤหัสมีสนามแม่เหล็กความเข้มสูง ดังนั้น ถ้าไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักของดาวพฤหัส ก็ควรอยู่ในอัญรูปที่สามารถผลิตสนามแม่เหล็กได้ เช่น มีสถานะเป็นโลหะไฮโดรเจนนั่นเอง สำหรับยานอวกาศจูโน่นั้นมีเครื่องมือวัดหลายชนิดที่จะวิเคราะห์องค์ประกอบของชั้นบรรยากาศ สนามแม่เหล็ก และความโน้มถ่วงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของดาวพฤหัส ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัดเหล่านี้จะสามารถยืนยันการมีอยู่ของโลหะไฮโดรเจนได้ [17] อย่างไรก็ดี มีความผิดพลาดบางอย่างที่ไอพ่นของยาน การวัดทางวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ ของยานอวกาศจูโน่จึงต้องใช้เวลานานกว่าที่นาซ่าได้วางแผนไว้ โดยภารกิจของยานจูโน่จะสิ้นสุดในปี พ.ศ. 2564 ในขณะที่ผู้แต่งเขียนบทความนี้การค้นพบโลหะไฮโดรเจนก็ยังคงเป็นปัญหาปลายเปิดต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] E. Wigner and H. B. Huntington, “On the possibility of a metallic modification of hydrogen”, Journal of Chemical Physics, 3, 764-770 (1935).

[2] G. D. Mahan, “Many-Particle Physics”, 3rd Edition, (Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2000).

[3] M. I. Eremets and I. A. Troyan, “Conductive dense hydrogen”, Nature Materials, 10, 927-931 (2011).

[4] D. F. Styer and N. W. Ashcroft, “Ground-state energy of metallic hydrogen in the Wigner-Seitz approximation”, Physical Review B, 29, 5562 (1984).

[5] T. Chachiyo, “Simple and accurate uniform electron gas correlation energy for the full range of densities”, Journal of Chemical Physics, 145, 021101 (2016).

[6] อุดมศิลป์ ปิ่นสุข, “สมการมหัศจรรย์: สมการชาชิโย”, Thai Journal of Physics, 36, 100-106 (2019).

[7] M. Born and J. R. Oppenheimer, “Zur Quantentheorie der Molekeln (On the Quantum Theory of Molecules)”, Annalen der Physik, 389, 457-484 (1927).

[8] P. Loubeyre, F. Occelli and P. Dumas, “Synchrotron infrared spectroscopic evidence of the probable transition to metal hydrogen”, Nature, 577, 631 (2020).

[9] D. M. Ceperley and B. J. Alder, “The calculation of the properties of metallic hydrogen using Monte Carlo”, Physica B, 108, 875 (1981).

[10] นพปฎล สุทธิศิริ, วิชิต ศรีตระกูล และ วิรุฬห์ สายคณิต, “การหาพลังงานต่ำสุดของโลหะไฮโดรเจน”, วารสารวิทยาศาสตร์, 38, 734 (1984).

[11] P. Moontragoon and U. Pinsook, “Metallic Hydrogen in a More Accurate Wigner-Seitz Approximation”, Journal of Scientific Research Chulalongkorn University, 28, 13 (2003).

[12] C.-F. Cheng, J. Hussels, M. Niu, H. L. Bethlem, K. S. E. Eikema, E. J. Salumbides, W. Ubachs, M. Beyer, N. Hölsch, J. A. Agner, F. Merkt, L.-G. Tao, S.-M. Hu and Ch. Jungen, “Dissociation Energy of the Hydrogen Molecule at 10^{-9} Accuracy”, Physical Review B, 121, 013001 (2018).

[13] R. P. Dias and I. F. Silvera, “Observation of the Wigner-Huntington transition to metallic hydrogen”, Science, 355, 715–718 (2017).

[14] H. Y. Geng, “Public debate on metallic hydrogen to boost high pressure research”, Matter and Radiation at Extremes, 2, 275-277 (2017).

[15] https://www.sciencealert.com/the-world-s-only-metallic-hydrogen-sample-has-disappeared

[16] arXiv:1907.03198 [cond-mat.other] and arXiv:1702.07192 [cond-mat.other]

[17] C. Jones, “Jupiter’s magnetic field revealed by the Juno spacecraft”, Nature, 561, 36-37 (2018).

บทความวิชาการ (Article)

ฟิสิกส์ของการสะท้อนกลับจากการกระทบของหยดของเหลว

คามิน กาญจนาประดิษฐ ศุภกฤษณ์ สร้อยสุวรรณ และ พรรณศิริ ดำโอ

สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

บทคัดย่อ

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

คำสำคัญ: การสะท้อนของหยดของเหลว, การตกกระทบของหยดของเหลว, เลขฟรุด, 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, Waber number, Reynolds number

(a) (b)

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

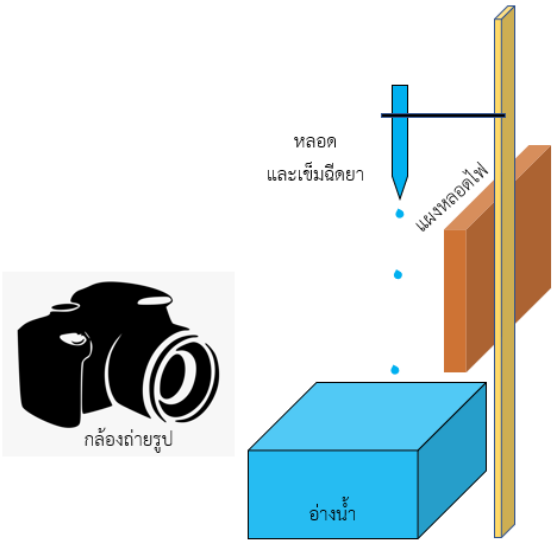
ปรากฏการณ์สะท้อนกลับของหยดของเหลว เป็นปรากฏการณ์ที่ลำของเหลวพุ่งขึ้นมา หลังจากเกิดการตกกระทบบนผิวของเหลวชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยมีลักษณะการตกและสะท้อนกลับดังภาพนิ่งและคลิปวิดีโอ ปรากฏการณ์นี้อาจจะมีหยดของเหลวทรงกลมเกิดขึ้นบนลำของเหลวดังกล่าว ก่อนที่จะตกกลับลงสู่พื้นผิวเดิม

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

ทีมวิจัยของมิชองเริ่มต้นศึกษาปรากฏการณ์สะท้อนกลับของหยดของเหลว โดยใช้น้ำหยดจากปลายเข็มฉีดยา หยดน้ำจากปลายเข็มดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.7 mm ตกลงมาอย่างอิสระจากความสูงใด ๆ กระทบน้ำที่บรรจุในภาชนะแก้วใสเพื่อให้สามารถสังเกตลักษณะของน้ำหลังจากการตกกระทบได้อย่างชัดเจน และได้บันทึกปรากฏการณ์นี้ด้วยกล้องวิดีโอที่ถูกจัดวางไว้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 *การจัดอุปกรณ์เพื่อบันทึกวิดีโอของปรากฏการณ์การตกของหยดน้ำบนผิวน้ำและการสะท้อนกลับ*

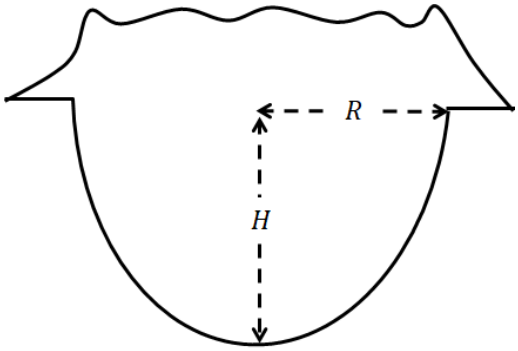
อ่างน้ำในรูปที่ 2 เป็นภาชนะแก้วใส ถูกออกแบบให้มีพื้นที่หน้าตัดและความลึกที่มากพอ เพื่อป้องกันผลจากการเกิดคลื่นสะท้อนกับผนังภาชนะ แต่อย่างไรก็ตาม ทีมของมิชองมิได้ให้ข้อมูลของระยะห่างระหว่างหยดของเหลวตอนเริ่มต้นกับผิวน้ำในอ่าง และขนาดของอ่างที่ใช้ในการทดลอง

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ทีมวิจัยของมิชองไม่ได้อธิบายไว้ในบทความวิจัย ผู้เขียนบทความนี้ จึงได้ทดลองตามวิธีที่ทีมของมิชองเสนอไว้ในรายงาน [3] ทำให้ทราบว่าการตกอย่างอิสระของหยดน้ำจากความสูงไม่เกิน 150 cm ภาชนะแก้วบรรจุน้ำควรมีขนาดพื้นที่หน้าตัดอย่างน้อย 15 cm × 15 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) โดยที่แรงคาปิลลารีทำหน้าที่ช่วยดึงน้ำขึ้นไปตามแนวดิ่งของโพรง ส่วนแรงโน้มถ่วงทำหน้าที่ดึงน้ำจากส่วนบนของโพรงกลับลงมา ถ้าโพรงที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก แรงคาปิลลารีจะส่งผลต่อ

การทำให้ผิวน้ำกลับสู่สภาพเดิมมากกว่าแรงโน้มถ่วง ในทางกลับกันหากโพรงมีขนาดใหญ่ขึ้น แรงโน้มถ่วงจะส่งผลต่อการทำให้น้ำกลับสู่สภาพเดิมมากกว่าแรงคาปิลลารี



รูปที่ 3 โพรงที่เกิดที่เกิดจากการตกกระทบของหยดน้ำบนผิวน้ำ มีความลึก H รัศมี R

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

$$U \sim \frac{\pi}{2}\rho_l g H^2 R^2 \tag{1}$$

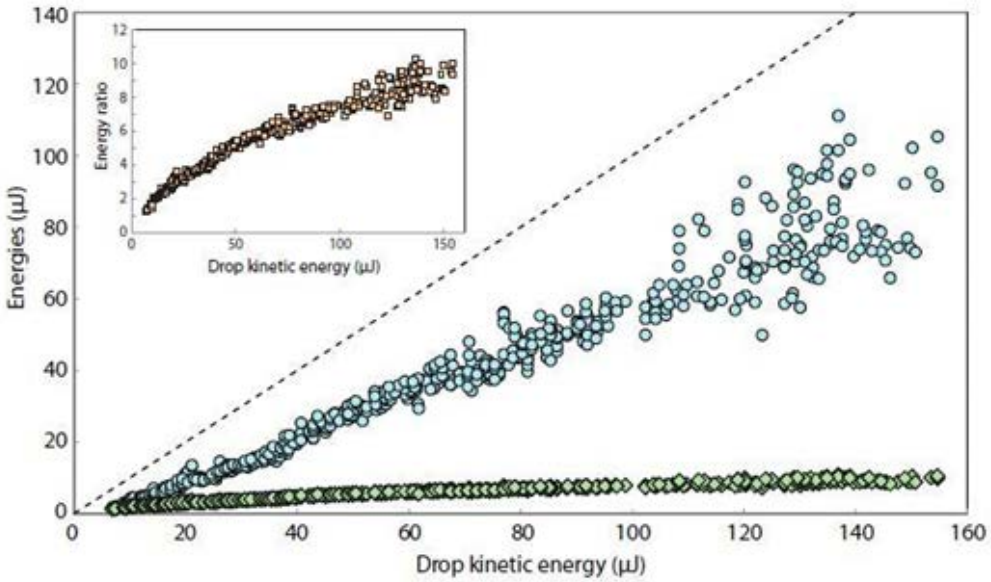
เมื่อ ρ_l เป็นความหนาแน่นของของเหลว และ g เป็นค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก พลังงานคาปิลลารี (C) ขึ้นอยู่กับขนาดของโพรงและความตึงผิว ดังสมการ

$$C \sim 2\pi\gamma HR \tag{2}$$

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

$$T = (\frac{1}{2})M_d v_i^2 \tag{3}$$

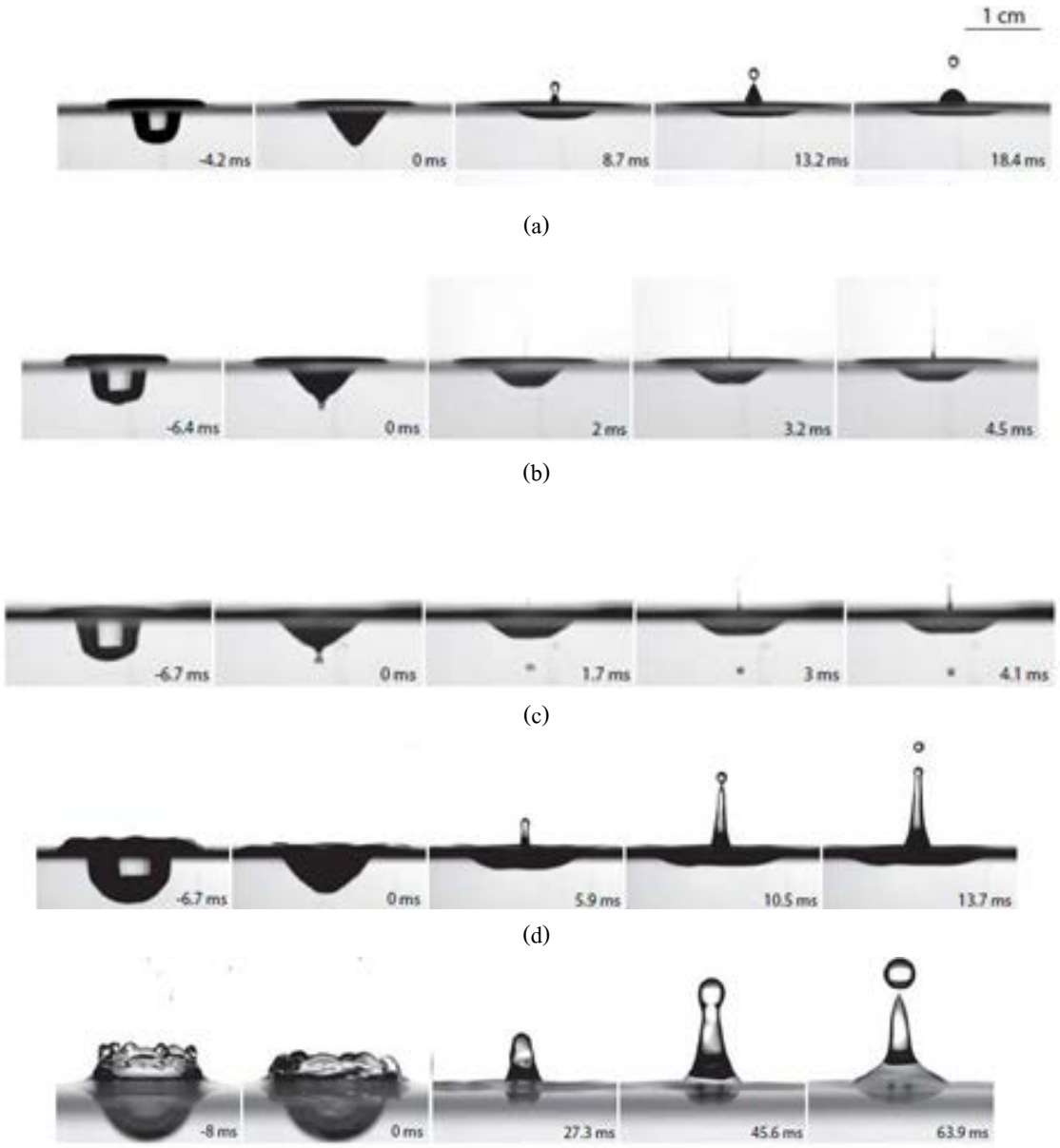
ทีมวิจัยของมิชองได้ศึกษาความสัมพันธ์ของพลังงานต่าง ๆ ได้แก่ พลังงานศักย์โน้มถ่วงกับพลังงานจลน์ พลังงานคาปิลลารีกับพลังงานจลน์ และอัตราส่วนพลังงานศักย์โน้มถ่วงต่อพลังงานคาปิลลารีกับพลังงานจลน์ แสดงไว้ดังรูปที่ 4



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

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

ลักษณะการตกและการสะท้อนของหยดน้ำที่เวลาต่าง ๆ



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

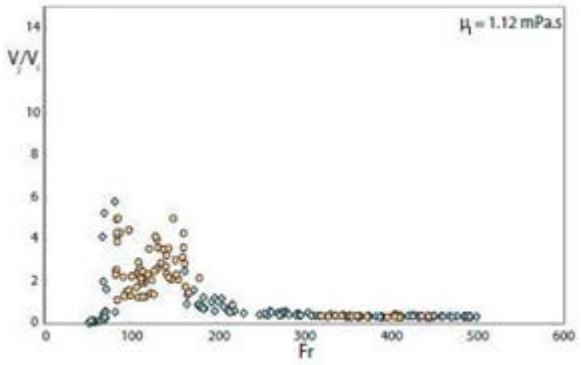
การตกกระทบของหยดน้ำทำให้เกิดการพุ่งขึ้นของน้ำเหนือผิวน้ำ (Rayleigh jet หรือ Worthington jet) ในที่นี้จะเรียกว่า “เจ็ท” (jet) ที่บริเวณปลายด้านบนของเจ็ทอาจมีน้ำส่วนหนึ่งที่แยกออกมา อาจมีจำนวนหนึ่งหยดหรือมากกว่าก็ได้ ความเร็วและรูปร่างของเจ็ทอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของหยดน้ำขณะตกกระทบ ขนาดของหยดน้ำที่ตกกระทบ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

และคณะ ได้นำเสนอความเร็วของหยดน้ำขณะตกกระทบในเทอมของเลขฟรุด (Froude number, Fr) ค่าของเลขฟรุดสื่อถึงอัตราส่วนของอัตราเร็วกำลังสองต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำที่ตกกระทบ เลขฟรุดคำนวณได้จากสมการที่ 4

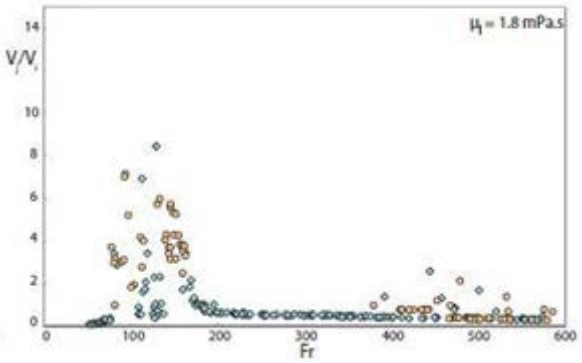
$$Fr = \frac{v_i^2}{gD_d} \tag{4}$$

จากรูปที่ 5 จาก (a – e) เลขฟรุดมีค่าเป็น 93.5, 127.5, 145, 348 และ 926 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเลขฟรุดสูงขึ้น ขนาดของโพรงจากการตกกระทบก็จะใหญ่ขึ้นด้วย เจ็ทที่พุ่งขึ้นมาและหยดน้ำมีขนาดหลากหลาย ในรูป (a) ผู้ทดลองสังเกตเห็นว่าเจ็ทพุ่งขึ้นมาเหนือผิวน้ำอย่างช้า ๆ และมีขนาดเล็ก ในรูป (b) และ (c) เจ็ทเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแต่มีลักษณะบาง ส่วนรูป (d) และ (e) เจ็ทเคลื่อนที่ขึ้นจากผิวน้ำช้าและมีขนาดใหญ่ ในบางครั้งหลังการตกกระทบแล้วเกิดโพรงยุบลงไปนั้น อาจมีฟองอากาศเกิดขึ้นที่บริเวณด้านล่างของโพรง (subcavity) โดยฟองนี้จะดิ่งตัวลึกลงไปแล้วเคลื่อนที่กลับมาด้านบน ดังที่ปรากฏในรูป (b) และ (c)

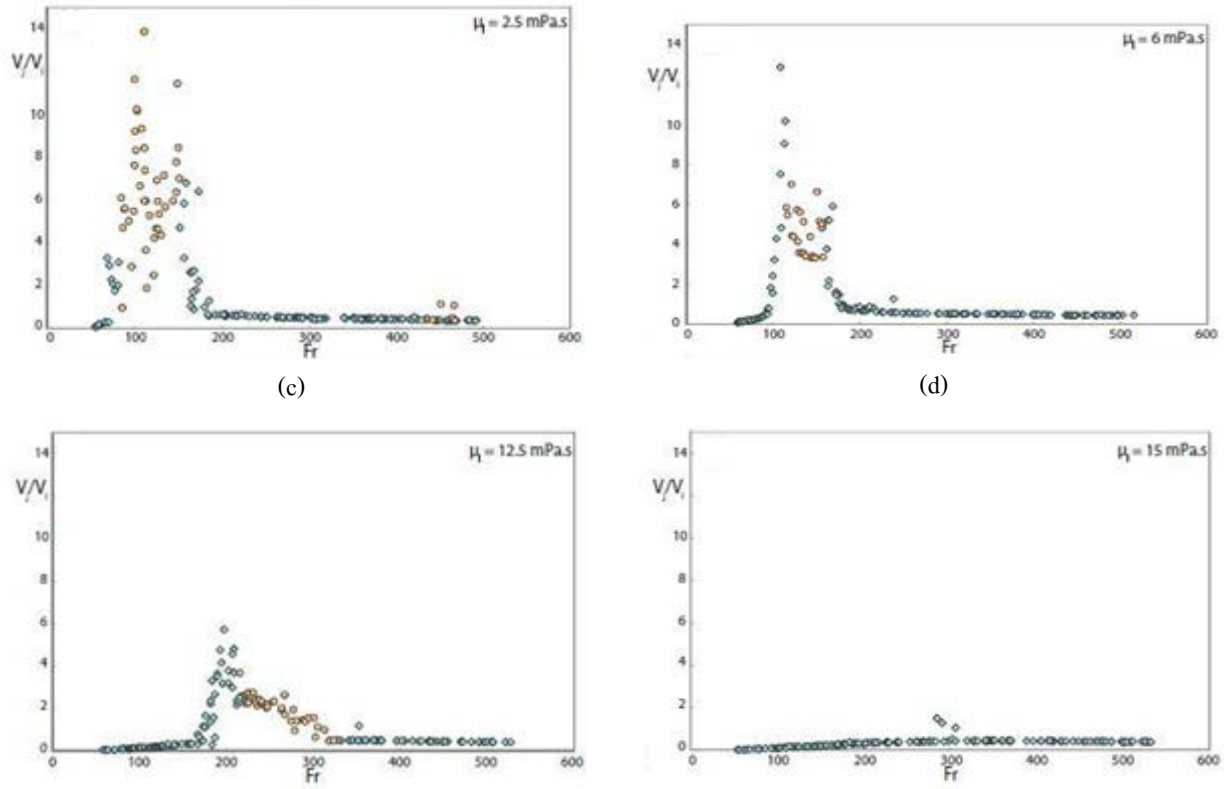
นอกจากนี้ทีมวิจัยของมิชองยังได้ศึกษาผลของความหนืดต่อการสะท้อนกลับของหยดของเหลว โดยใช้ของเหลวที่มีความหนืดแตกต่างกัน 6 ค่า ได้แก่ 1.12, 1.8, 2.5, 6, 12.5 และ 15 mPa·s จากนั้นได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขฟรุดกับอัตราส่วนของอัตราเร็วเจ็ทต่ออัตราเร็วขณะตกกระทบของหยดน้ำ ดังรูปที่ 6 ทีมวิจัยของมิชองได้สังเกตพบสิ่งที่น่าสนใจคือ ที่ความหนืดตั้งแต่ 6 mPa·s ลงไป อัตราส่วนความเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดสูงขึ้น แต่สำหรับความหนืดที่มีค่าสูงกว่า 6 mPa·s ค่าสัดส่วนความเร็วจะลดลงเมื่อความหนืดสูงขึ้น เมื่อพิจารณาที่ค่าเลขฟรุดประมาณ 300 ขึ้นไป ค่าสัดส่วนของอัตราเร็วจะไม่ขึ้นอยู่กับความหนืด



(a)



(b)



รูปที่ 6 *กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขฟรุดกับอัตราส่วนความเร็วของของเหลวที่มีความหนืดจากน้อยไปมาก (a – f) [3]*

การศึกษาการหยดของของเหลวบนผิวของเหลวที่มีอุณหภูมิต่าง ๆ

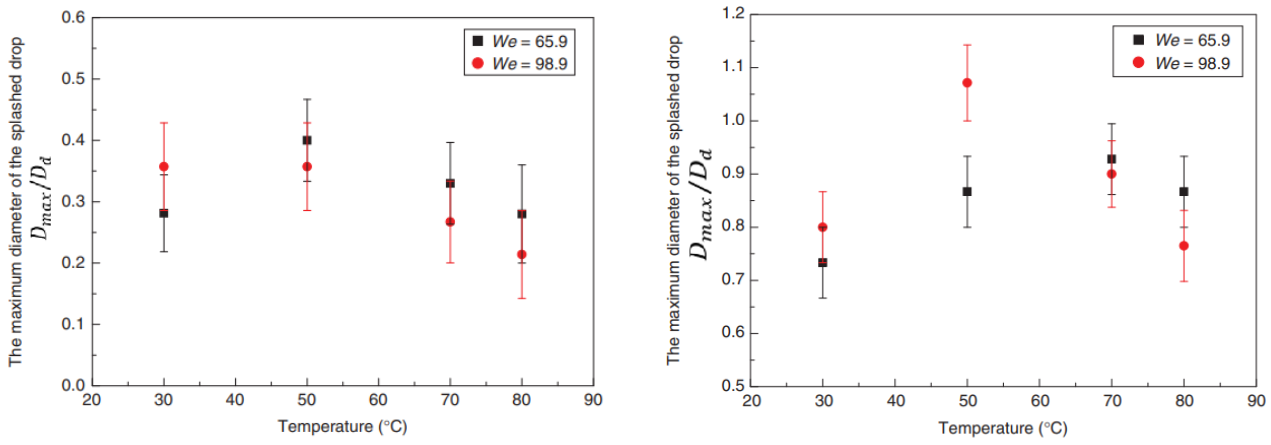
เมื่อกล่าวถึงผลจากความหนืดที่มีต่อการสะท้อนของหยดของเหลวแล้ว ผู้อ่านบางท่านอาจมีข้อสงสัยเช่นเดียวกับผู้เขียนว่า ถ้าทดลองหยดของเหลวให้ตกกระทบลงบนพื้นผิวของเหลวที่มีอุณหภูมิต่าง ๆ กัน จะส่งผลต่อการสะท้อนของของเหลวอย่างไร ผู้เขียนได้ค้นคว้าเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิก็ได้พบบทความวิจัยของ หวางและคณะ (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] ในงานวิจัยนี้นักวิจัยได้จัดอุปกรณ์ทดลองคล้ายคลึงกับทีมของมิชอง แต่แตกต่างกันที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำตอนเริ่มต้นที่มีขนาดประมาณ 2.4 mm (เล็กกว่าของทีมมิชองประมาณ 0.3 mm) ของเหลวที่จะถูกตกกระทบด้วยหยดน้ำนั้นเป็นเชื้อเพลิงที่บรรจุอยู่ในภาชนะรูปทรงกระบอกที่พื้นที่หน้าตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm และสำหรับระยะระหว่างหยดน้ำกับผิวของเหลวนั้น นักวิจัยได้จัดตำแหน่งให้น้ำหยดโดยใช้เวลา 2 ms ในการตกถึงผิวของเหลวเชื้อเพลิง

ในงานวิจัยนี้ ทีมของหวางได้พิจารณาเลขเวเบอร์ (Weber number, We) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 5

$$We = \frac{\rho_d v_i^2 D_d}{\sigma_d} \tag{5}$$

เมื่อ ρ_d และ σ_d คือความหนาแน่นและความตึงผิวของหยดน้ำ

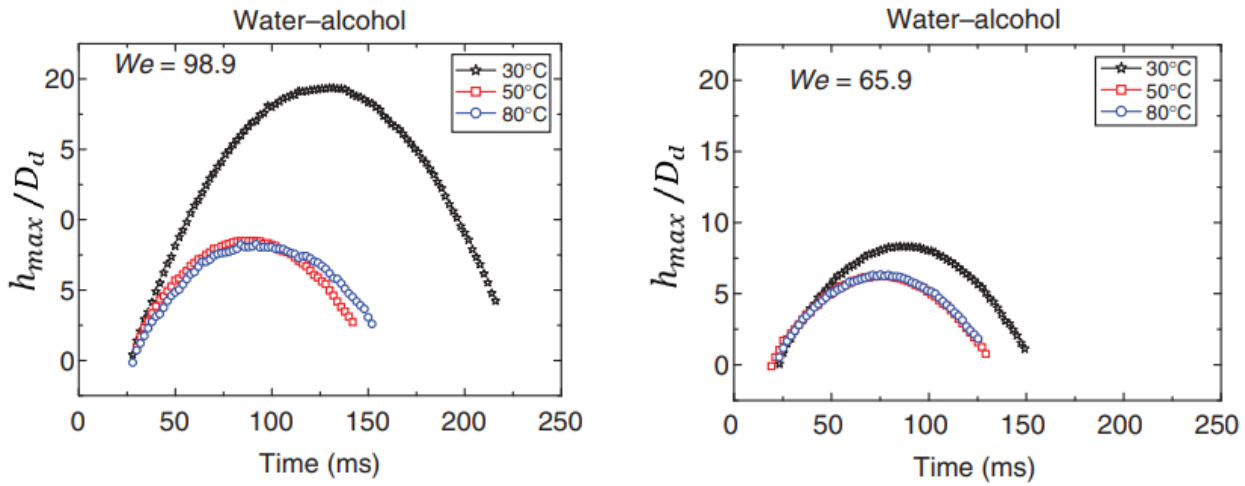
จากการศึกษาขนาดของส่วนของหยดน้ำที่แยกออกมาจากเจ็ท ซึ่งเรียกส่วนของหยดน้ำที่แยกออกมานี้ว่า “สแปลช” ได้ผลการทดลองตามกราฟในรูปที่ 7



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

จากรูปที่ 7 ทีมของหวางได้ตั้งข้อสังเกตไว้ว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสแปลชที่โตที่สุด (D_{max}) ในกรณีของเคโรซีนที่มีเลขเวเบอร์ 65.9 และ 98.9 ปรากฏที่อุณหภูมิประมาณ 50°C ส่วนกรณีของแอลกอฮอล์ที่มีเลขเวเบอร์ 98.5 ขนาดของสแปลชโตที่สุดปรากฏที่อุณหภูมิประมาณ 50°C เช่นเดียวกับที่สังเกตได้ในเคโรซีน แต่แอลกอฮอล์ที่มีเลขเวเบอร์ 65.5 ขนาดของสแปลชโตสุดที่อุณหภูมิประมาณ 70°C และทีมของหวางยังให้ข้อสังเกตว่าหลังจากของเหลวเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดมีอุณหภูมิผ่านค่าที่ให้ขนาดของสแปลชสูงสุดแล้ว ขนาดของสแปลชจะมีค่าลดลง ทีมวิจัยของหวางได้อธิบายข้อสังเกตนี้ว่าน่าจะเกิดจากการลดลงอย่างรวดเร็วของความหนืดพลวัต (dynamic viscosity) อันเนื่องมาจากอุณหภูมิของของเหลวมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

ทีมของหวางยังได้ศึกษาความสูงที่สแปลชสามารถเคลื่อนที่ขึ้นไปได้ ซึ่งได้ผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 8



(a) (b)

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

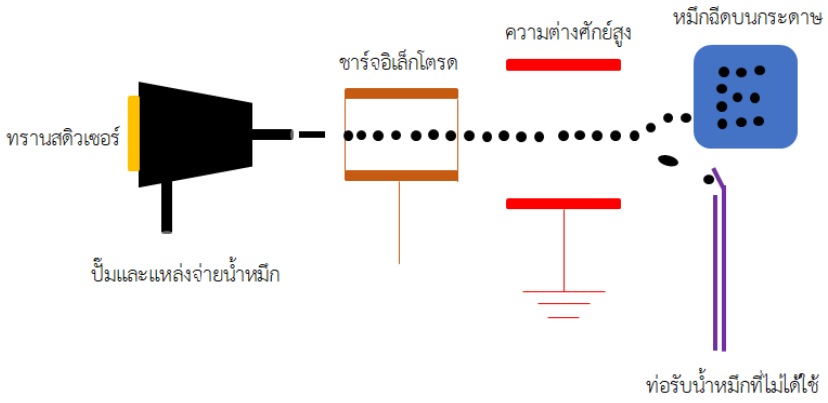
ทีมวิจัยของหวางได้รายงานผลการทดลองตามรูปที่ 8 ไว้ว่า ความสูงมากที่สุดของสแปลช (h_{max}) สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนที่อุณหภูมิของแอลกอฮอล์ประมาณ 30°C แต่ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50°C ขึ้นไป ค่าความสูงมากที่สุดของสแปลชจะปรากฏไม่ชัดเจนนัก

จากงานวิจัยของหวางสามารถสรุปได้ว่าเลขเวเบอร์และอุณหภูมิของของเหลวส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสแปลชและความสูงที่สแปลชเคลื่อนที่ขึ้นไปได้นั่นเอง

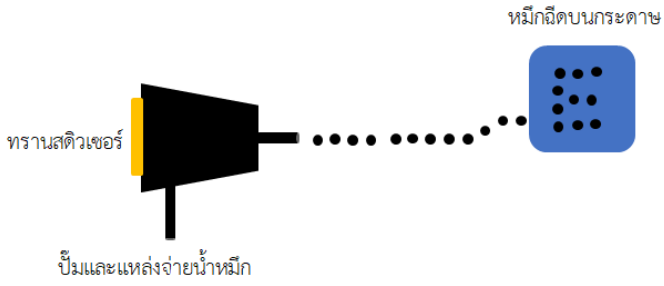
การประยุกต์ใช้ความรู้จากปรากฏการณ์สะท้อนของหยดของเหลว

ความรู้จากการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์สะท้อนกลับของหยดของเหลวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ในบทความนี้จะนำเสนอการประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท (ink jet) และการสืบสวนในทางนิติวิทยาศาสตร์จากหยดของเหลว

การประยุกต์ใช้กับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทที่ใช้ในปัจจุบันมีระบบฉีดหมึก 2 แบบ ได้แก่ แบบฉีดต่อเนื่อง (continuous inkjet, CIJ) และแบบหยดหมึกตามความต้องการ (drop-on-demand, DOD) โดยมีกลไกการฉีดหมึกดังแสดงในรูปที่ 9



(a)



(b)

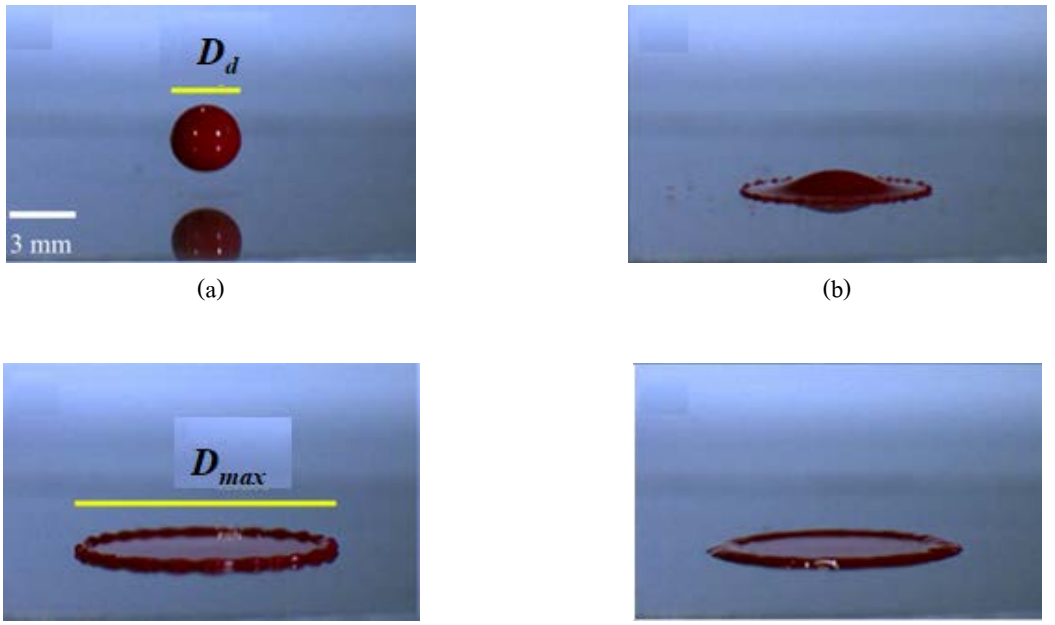
รูปที่ 9 *กลไกของหัวพิมพ์อิงค์เจ็ท (a) แบบฉีดต่อเนื่อง และ (b) แบบหยดหมึกตามความต้องการ*

ระบบอิงค์เจ็ทแบบ CIJ ในรูปที่ 9 (a) ใช้หลักการให้ความร้อน (heat pulse) กับน้ำหมึก เมื่อได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอและได้รับการสั่นสะเทือนจากทรานสดิวเซอร์ น้ำหมึกจะถูกดันออกมาจากแหล่งจ่ายอย่างต่อเนื่อง เมื่อลำของน้ำหมึกที่พุ่งผ่านชาร์จอิเล็กโตรดจะทำให้ลำของน้ำหมึกถูกแยกออกเป็นหยดน้ำหมึกขนาดเล็กลงหลาย ๆ หยด จากนั้นหยดหมึกเหล่านี้จะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นโลหะคู่ขนานที่มีความต่างศักย์สูง การกำหนดค่าความต่างศักย์ที่แตกต่างกันจะเป็นกลไกควบคุมขนาดและการเบนทิศทางของหยดหมึกให้เป็นตามลักษณะอักษรหรือรูปร่างของสิ่งที่ต้องการพิมพ์ ส่วนน้ำหมึกที่ไม่ถูกใช้งานก็จะถูกดักลงไปในท่อเพื่อส่งไปรวมในที่เก็บน้ำหมึกเพื่อนำกลับไปใช้ต่อไป ส่วนระบบอิงค์เจ็ทแบบ DOD หยดน้ำหมึกจะถูกผลิตตามที่ต้องการ ด้วยการใส่แรงดัน (pressure pulse) เข้าไปในแท่นปล่อยน้ำหมึก ผู้พัฒนาจะต้องออกแบบให้ระบบสามารถปรับขนาดของหยดน้ำหมึกให้เหมาะสม และควบคุมความดันที่จะส่งผลต่อความเร็วของน้ำหมึกที่ถูกปล่อยออกมา [7] จะเห็นได้ว่าการที่จะฉีดน้ำหมึกให้ได้อักษรหรือรูปร่างตามที่ต้องการให้ปรากฏบนสิ่งพิมพ์นั้น ผู้สร้างเครื่องพิมพ์จะต้องออกแบบกลไกให้เหมาะสม อาทิเช่น กำหนดขนาดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าและกำหนดแรงดันให้

เหมาะสมสำหรับระบบ CIJ และ DOD ตามลำดับ ใช้น้ำหมึกที่มีความหนืดที่พอดีเพื่อให้สามารถฉีดไปบนสิ่งพิมพ์ได้ตามต้องการ โดยทั่วไปหยดน้ำหมึกที่ฉีดออกมาจากหัวฉีดจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 84 μm และกระทบกระดาษด้วยอัตราเร็วประมาณ 20 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) แก้วอะคลิลิค (acrylic glass) เทรสปา [1] (Trespa) และโพลิออกซิเมทิลีน (polyoxymethylene) ด้วยอัตราเร็วและมุมตกกระทบ (α) ต่าง ๆ กัน ในรูปที่ 10 ได้แสดงลักษณะของการตกกระทบของหยดเลือดที่เวลาต่าง ๆ



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

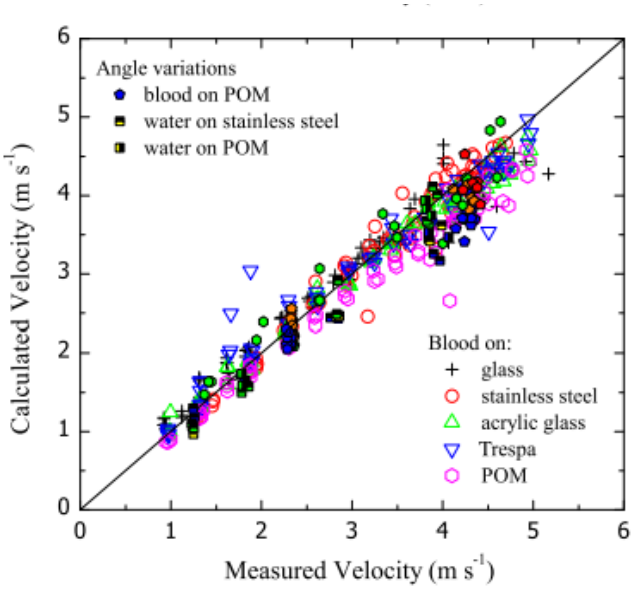
[1] เทรสปา เป็นชื่อเฉพาะของวัสดุที่มีความทนทานต่อความดันสูง

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

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

เมื่อ Re คือเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) โดย $Re \equiv \frac{\rho D_d v_i}{\mu_l}$, P เป็นพารามิเตอร์ที่แปลงมาจากค่าโมเมนตัมของหยดเลือดที่ตกกระทบ โดย $P = WeRe^{-2/5}$ และ A คือค่าคงที่ [2] 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 หากเจ้าหน้าพิสูจน์หลักฐานทราบขนาดของคราบเลือดที่ตกบนพื้นผิวใด ๆ ก็สามารถนำไปคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความเร็วตกกระทบของหยดเลือดที่อยู่ในรูปของเลขเรย์โนลด์ เมื่อทราบความเร็วตกกระทบ ก็สามารถคำนวณหาค่าความสูงหรือตำแหน่งเริ่มต้นที่เลือดตกลงมา ซึ่งข้อมูลเหล่านี้อาจนำไปสู่การคลี่คลายคดีได้ในที่สุด

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).