

บทที่ 3

เลเซอร์ไดโอด

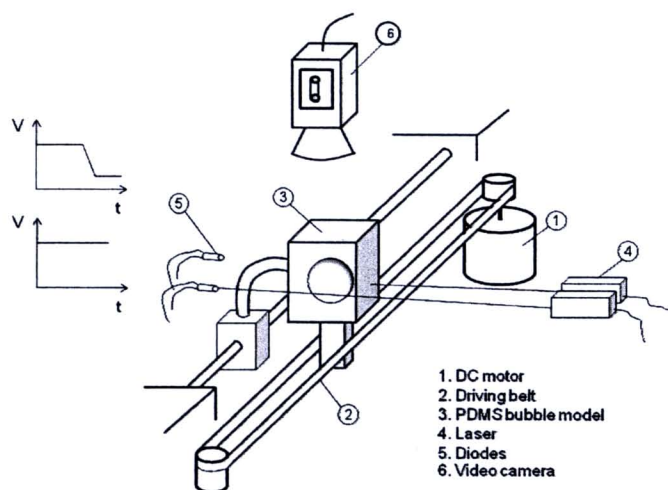
ในการศึกษานี้ได้พยายามพัฒนาเครื่องมือเลเซอร์ไดโอดให้สามารถวัดพารามิเตอร์ของฟองอากาศที่กำลังเคลื่อนที่ได้ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ การสอบเทียบอุปกรณ์กับการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วและความเร่งต่าง ๆ และการทดลองวัดกับการไหลฟองอากาศจริง ๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การสอบเทียบเครื่องมือวัดกับแบบจำลองฟองอากาศ

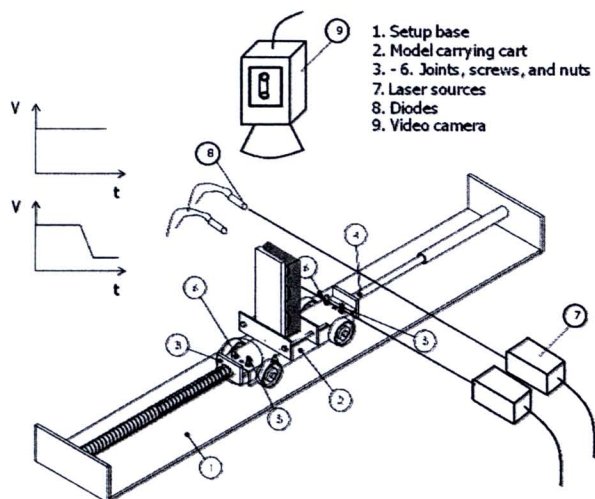
การศึกษาในปีนี้ได้พัฒนาและปรับปรุงชุดทดลองให้สามารถเคลื่อนที่แบบจำลองฟองอากาศที่เป็นรูปครึ่งทรงกลมด้วยความเร็วต่าง ๆ ได้ โดยใช้หลักการของการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) และหลักการของรถเลื่อนบนรางสปริงดังแสดงในรูปที่ 3.1 ก-ข ตามลำดับ โดยชุดทดลองดังกล่าวออกแบบเพื่อศึกษาเบื้องต้นถึงผลกระทบของความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ต่อลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากระบบเลเซอร์ไดโอด

ระบบแรกเป็นการขับเคลื่อนแบบจำลองด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการสร้างแบบจำลองฟองอากาศบนระบบรางเลื่อน และเลื่อนแบบจำลองฟองอากาศให้เคลื่อนที่ไปด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า สำหรับระบบที่สองเป็นชุดทดลองที่ประกอบด้วยฐานรางเลื่อน รถที่บรรทุกแบบจำลองฟองอากาศและระบบสปริง การเคลื่อนที่แบบจำลองฟองอากาศใช้สปริงเป็นตัวขับเคลื่อน โดยระบบทั้งสองมีระบบเลเซอร์และวงจรไดโอดรวมทั้งกล้องวีดีโอเพื่อทำการสอบเทียบความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศ

อุปกรณ์ทดลองทั้งสองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศให้มีความเร็วต่าง ๆ กัน โดยจากการศึกษาในปีแรก ซึ่งเป็นการสอบเทียบแบบสถิตและมีผลการสอบเทียบที่แสดงว่า หากสามารถวัดความเร็วของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศไปพร้อมกับการตรวจสอบการลดลงของความเข้มเลเซอร์ที่ตกกระทบบนไดโอดได้ น่าจะทำให้ระบบเลเซอร์ไดโอดที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถวัดรัศมีความโค้งของฟองอากาศที่เคลื่อนที่อยู่ได้เลย ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีแนวคิดในการวัดความเร็วของการเคลื่อนที่โดยใช้ระบบเลเซอร์ไดโอดเลย ซึ่งหลักการที่ใช้ไม่ซับซ้อนเพียงแค่การเพิ่มระบบเลเซอร์ไดโอดเข้าไปอีกหนึ่งชุด และวางชุดเลเซอร์ทั้งสองเรียงอนุกรมไปตามทิศการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศ ซึ่งเมื่อมีการกำหนดระยะห่างระหว่างลำเลเซอร์ทั้งสองแน่นอนแล้ว หากวัดเวลาที่แบบจำลองเคลื่อนที่ตัดผ่านลำเลเซอร์ทั้งสองได้ผู้วัดจะสามารถหาค่าความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศได้ โดยระยะห่างระหว่างเลเซอร์ทั้งสองควรจะมีระยะห่างไม่มากนัก เช่น ระยะไม่เกิน 0.5 เท่าของรัศมีฟองเป็นต้น เพื่อจะทำให้ได้ความเร็วเฉลี่ยที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับความเร็วของการเคลื่อนที่จริง ซึ่งเป็นการวัดความเร็วของฟองอากาศในลักษณะเดียวกันกับงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งกล่าวถึงในบทนำ



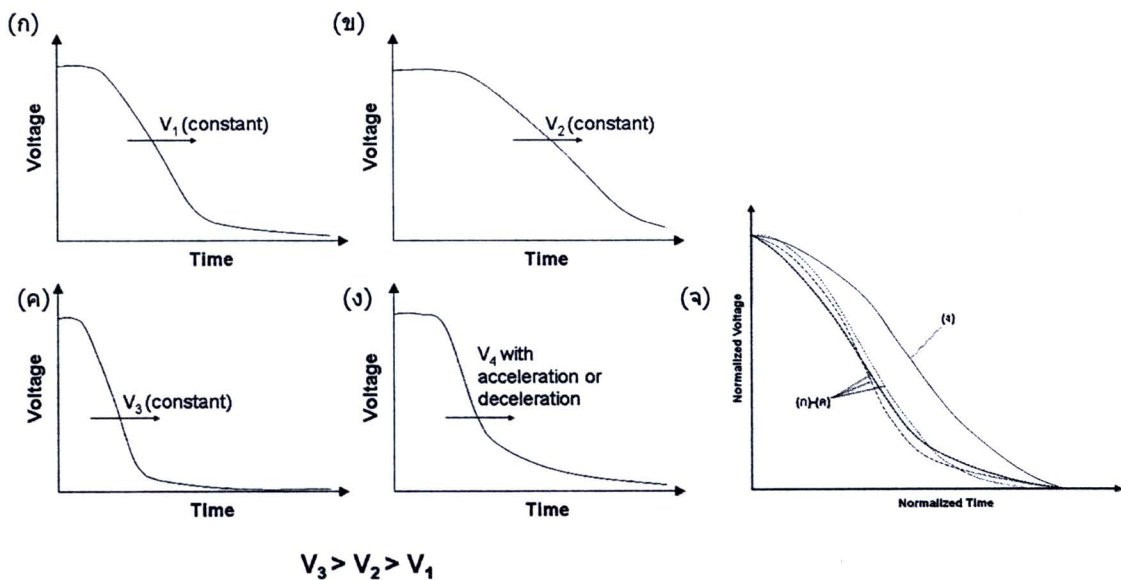
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 ชุดทดลองสำหรับการสอบเทียบที่ความเร็วและความเร่งต่าง ๆ ของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศจำลอง; (ก) การทดลองด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและสายพาน (ข) การทดลองด้วยระบบสปริง

อย่างไรก็ตามข้อจำกัดหนึ่งของวิธีการนี้คือ ความเร่งของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศต้องไม่สูงนัก เพราะอาจจะทำให้แนวโน้มของการลดลงของปริมาณเลเซอร์ที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอดมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป และส่งผลทำให้การลดลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงลักษณะของการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผู้วิจัยนำเอาข้อมูลจากการศึกษาแบบสถิตมาวิเคราะห์และมีสมมติฐานว่าน่าจะเกิดขึ้นเมื่อฟองอากาศขนาดรัศมีความโค้งคงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ต่าง ๆ (รูปที่ 3.2 ก-ค) และการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขนาดเท่าเดิมที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่คงที่หรือมีความเร่ง (รูปที่ 3.2ง) สำหรับการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขนาดเดียวกันด้วยความเร็วคงที่ต่าง ๆ กัน จะมีลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีความคล้ายคลึงกันเมื่อทำการ normalization เวลาด้วยเวลาทั้งช่วงที่ความต่างศักย์ลดลงจนเป็นศูนย์ แต่สำหรับการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขนาดเดิมที่มีความเร่งจะทำให้ลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปและเมื่อทำการ normalization แล้วจะมีลักษณะที่แตกต่างออกไปจากกรณีความเร็วคงที่ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จ และหากความเร่งมีค่าเพิ่มขึ้นความแตกต่างนี้ก็น่าจะเด่นชัดขึ้น



รูปที่ 3.2 ลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอด เมื่อฟองอากาศเคลื่อนที่แบบต่าง ๆ

ดังนั้นผลของความเร็วและความเร่งต่อความแม่นยำในการวัดรัศมีความโค้งของฟองอากาศด้วยระบบเลเซอร์ไดโอดจึงเป็นประเด็นที่สำคัญ และในการศึกษานี้ได้เลือกออกแบบระบบสอบเทียบที่สามารถสร้างขนาดความเร็วและความเร่งต่าง ๆ ได้ โดยมีรายละเอียดสำหรับการทดลองที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่และการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ดังต่อไปนี้

3.1.1 การสอบเทียบด้วยการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วคงที่

ส่วนประกอบที่สำคัญของชุดทดลองในส่วนนี้ได้แก่ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง วงจรโฟโตไดโอด 1 ชุดและแบบจำลองฟองอากาศ โดยรายละเอียดที่สำคัญของแต่ละส่วนประกอบจะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

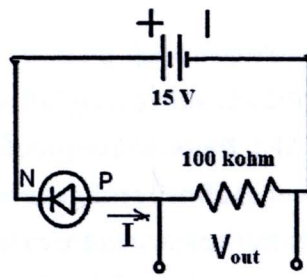
3.1.1.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในส่วนของชุดทดลองที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขับเคลื่อนจะสามารถควบคุมความเร็วและความเร่งได้สะดวกโดยการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ อย่างไรก็ตามหากต้องการจะเปลี่ยนแปลงความเร็วของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองจะต้องทำการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่ป้อนสู่มอเตอร์ในขณะที่การเคลื่อนแบบจำลองฟองอากาศ ซึ่งจำเป็นจะต้องมี DC supply ที่สามารถรับสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า (Function generator) ได้ ซึ่งคณะวิจัยไม่สามารถหาเครื่องมือดังกล่าวได้ในขณะนี้ ดังนั้นจึงมีแนวคิดว่าจะใช้ชุดทดลองแรกนี้ในการเคลื่อนที่แบบจำลองด้วยความเร็วคงที่ต่าง ๆ เท่านั้น โดยในการทดลองเบื้องต้นได้ประยุกต์ระบบขับเคลื่อนขึ้นมาโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 35 วัตต์ และความต่างศักย์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนในช่วง 5-24 โวลต์ (แหล่งข้อมูล: <http://www.datasheetarchive.com/mitsumi%20dc%20motor-datasheet.html> : หาข้อมูล 20 พ.ค. 2553) และระบบสายพานตามแสดงในรูปที่ 3.1ก ซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศประมาณ 30 เซนติเมตร

3.1.1.2 วงจรโฟโตไดโอด

สำหรับวงจรไดโอดได้มีการเปลี่ยนมาใช้โฟโตไดโอดตัวใหม่เนื่องจากความสะดวกในการสั่งซื้อซึ่งทำให้มีคุณสมบัติบางอย่างแตกต่างไปจากการทดลองในปีก่อน โดยวงจรไดโอดมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ โฟโตไดโอด เครื่อง DC regulator และตัวต้านทาน ซึ่งมีแผนผังของอุปกรณ์ต่างๆตามวงจรในรูปที่ 3.3

การเลือกโฟโตไดโอดสำหรับการทดลองนั้นมีหลักเกณฑ์สำคัญ 2 อย่างคือ หลักเกณฑ์แรกคือช่วงความยาวคลื่นของแสงที่มีการตอบสนองสูงสุด (peak sensitivity) โดยเลือกให้ตรงกับความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการทดลองมากที่สุด ซึ่งเลเซอร์ในการทดลองนี้มีความยาวคลื่นของแสงสีแดงประมาณ 630 nm (10 mW, diameter 0.65 mm) สำหรับหลักเกณฑ์ที่สองนั้นก็คือ มุมรับแสงที่จะทำให้การตอบสนองลดลงครึ่งหนึ่ง (acceptance angle at 50%) โดยเลือกโฟโตไดโอดที่มี acceptance angle เล็กเพื่อที่จะสามารถตรวจสอบแสงที่ถูกหักเหออกไปได้เร็วขึ้น จากหลักเกณฑ์ที่กล่าวมาข้างต้นจึงได้เลือกโฟโตไดโอดยี่ห้อ EPIGAP รุ่น EPD-660-5 ซึ่งมี peak sensitivity อยู่ที่ 660 nm และมีมุมรับแสงที่จะทำให้การตอบสนองลดลงครึ่งหนึ่งอยู่ที่ 40 องศา และมีคุณสมบัติอื่นๆ ดังตารางที่ 3.1 โดยมีพารามิเตอร์ที่น่าสนใจได้แก่ ขนาด Active area ประมาณ 0.13 mm² ทำให้เกิดความลำบากในการวางตำแหน่งให้ตรงกับลำเลเซอร์ ค่า Reverse voltage เท่ากับ 10 โวลต์หมายความว่าต้องมีอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงกว่า 10 โวลต์ รวมถึง Rise time และ Fall time ประมาณ 15-30 ns แสดงให้เห็นว่าระบบวงจรไดโอดนี้สามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็วในระดับ 1 MHz



รูปที่ 3.3 แผนผังของวงจรโฟโตไดโอดที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยโฟโตไดโอด ตัวต้านทาน และแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติต่างๆของโฟโตไดโอดที่ใช้สำหรับการทดลอง (EPIGAP)

Parameter	Test conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Active area		A		0.13		mm ²
Peak sensitivity		λ_{Smax}	620	660	700	nm
Spectral bandwidth at 50%		$\Delta\lambda_{0.5}$		25		nm
Acceptance angle at 50% S_e				40		deg.
Responsivity at 660 nm	$V_R = 0$ V	S_e		0.42		A/W
Short-circuit current*	$V_R = 0$, $E_e = 1$ mW/cm ²	I_{sc}		0.85		μ A
Dark current	$V_R = 5$ V, $E_e = 0$	I_D		40	200	pA
Reverse voltage	$I_R = 10$ μ A	V_R		10		V
Junction capacitance	$V_R = 0$, $E_e = 0$	$\bar{N}$		40		pF
Rise time	$R_L = 50$,	t_r		15		ns
Fall time	$V_R = 5$ V	t_f		30		

ในส่วนของการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองก็คือความต่างศักย์สำหรับไบแอสยอนโฟโตไดโอด การเลือกความต่างศักย์สำหรับไบแอสยอนโฟโตไดโอดนั้นจะต้องมีค่าสูงพอที่จะทำให้โฟโตไดโอดอยู่ในสถานะที่กระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับ ความเข้มแสงได้ และจะต้องไม่สูงเกินค่าความต่างศักย์สูงสุดที่โฟโตไดโอดรับได้ซึ่งไม่ได้มีการระบุไว้ ดังนั้นผู้ทำการทดลองจึงได้เลือกความต่างศักย์จากเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลองเป็น 15 โวลต์ ในส่วนของตัวต้านทานนั้นได้เลือกใช้ตัวต้านทานที่มีความต้านทานขนาด 100 กิโลโอห์ม ซึ่งจะทำให้ค่าความต่างศักย์ที่วัดคร่อมตัวต้านทานในระหว่างการทดลองมีค่าสูงทำให้สัญญาณรบกวนเป็นสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับสัญญาณที่ต้องการวัด แต่ในขณะเดียวกันความต้านทานต้องมีค่าไม่สูงเกินไปจนความต่างศักย์คร่อมโฟโตไดโอดไม่สูงเพียงพอสำหรับการไบแอสยอน นอกจากนี้ในการทำการทดลองได้เลือกใช้ sampling frequency เพื่อวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรเท่ากับ 50 kHz และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกจากวงจรโฟโตไดโอดเมื่อมีลำแสงเลเซอร์มาตกกระทบเท่ากับ 15-16 โวลต์ในทุกการทดลอง

3.1.1.3 แบบจำลองฟองอากาศ

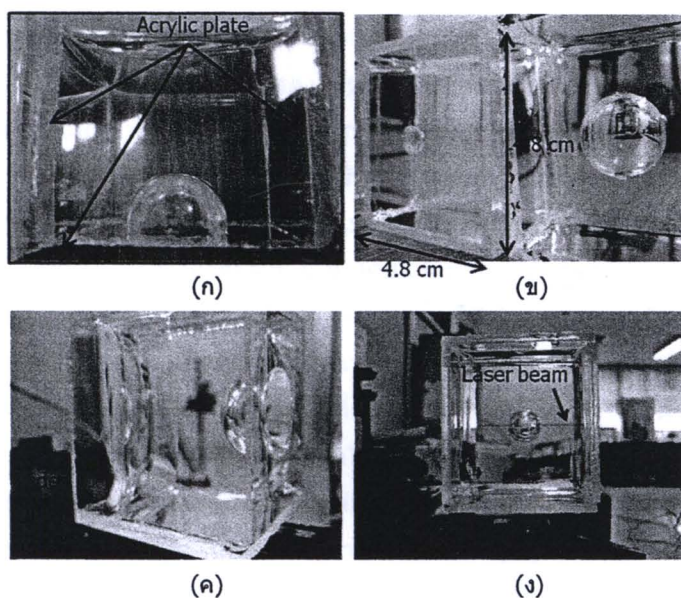
สำหรับแบบจำลองฟองอากาศเลือกใช้วัสดุคือ Polydimethylsiloxane (PDMS) เนื่องจาก PDMS หรือมีชื่อสินค้าว่า Sylgard 184 นั้นเป็นโพลิเมอร์ที่มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับกลีเซอริน คือมีค่าประมาณ 1.430 ในขณะที่กลีเซอรินนั้นมีค่าดัชนีหักเหอยู่ที่ 1.47 (กลีเซอริน 100% วัดที่อุณหภูมิ 20°C) ในการทดลองนี้ได้แยกแม่พิมพ์ของแต่ละขนาดฟองอากาศออกจากกัน โดยแม่พิมพ์ของแบบจำลองฟองอากาศมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ขนาด คือ 6, 8, 13, 16, และ 22 mm ซึ่งมีรัศมีความโค้ง (R) 3, 4, 6.5, 8, และ 11 mm ตามลำดับ โดยแม่พิมพ์ทำจากลูกปัดทรงกลมแล้วนำมาผ่าและขัดให้เป็นรูปครึ่งทรงกลม ซึ่งเป็นขึ้นเดียวกับการทดลองในปีแรก อย่างไรก็ตามปัญหานี้คือลูกปัดอาจจะไม่กลมอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงเลือกใช้รัศมีความโค้งของแต่ละกรณีให้มีระยะห่างกัน (> 1 mm) ระดับหนึ่ง

ส่วนตัวโครงของแม่พิมพ์นั้นมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 4.8 cm ยาว 5.6 cm และสูง 4.8 cm โดยผาด้านข้างทั้ง 4 ด้านและผาด้านล่างนั้นทำจากแผ่นอะคริลิกใสหนา 3 mm ผาด้านข้างทั้ง 4 ด้านถูกยึดติดกันด้วยกาวอีพอกซี ส่วนผาด้านล่างนั้นใช้ดินน้ำมันเป็นตัวยึดไว้ในระหว่างการขึ้นรูปแบบจำลองฟองอากาศเพื่อให้่ายต่อการนำลูกปัดออกจากแบบจำลองฟองอากาศในภายหลัง

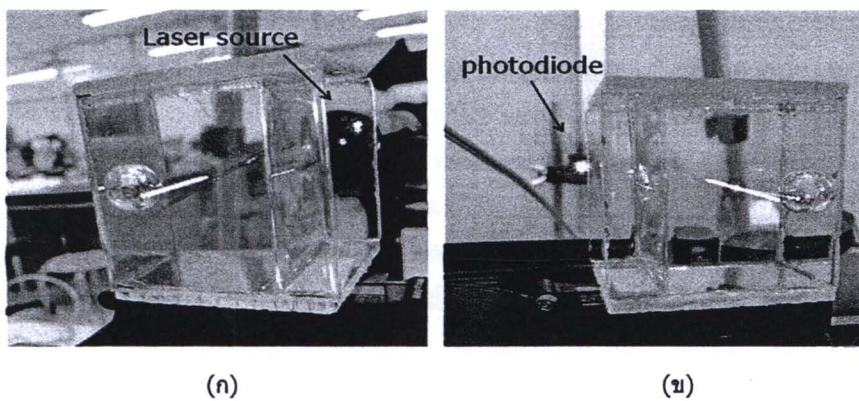
หลังจากนั้น จึงทำการผสม PDMS ด้วยอัตราส่วนระหว่างมวลของ monomer และ catalyst เท่ากับ 10:1 คนในเข้ากันที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะทำให้มีฟองอากาศขนาดใหญ่จำนวนมากแทรกเข้าไปในเนื้อวัสดุ ดังนั้นจึงต้องนำไปใส่ในตู้สุญญากาศเพื่อดูดเอาอากาศที่แทรกออกจนหมดก่อน หลังจากนั้นจึงนำ PDMS ไปเทใส่แม่พิมพ์และอบภายในเตาอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แบบจำลองฟองอากาศที่ทำออกมานั้นมีความสูงเฉพาะส่วนที่เป็นวัสดุ PDMS ไม่เท่ากัน โดยจะมีความสูงอยู่ในช่วง 3-4 cm ซึ่งทำให้น้ำหนักรวมของแบบจำลองแต่ละขนาดไม่เท่ากันด้วย โดยลักษณะของแบบจำลองฟองอากาศแสดงดังรูปที่ 3.4 จากการวัดขนาดรัศมีความโค้งของแบบจำลองฟองอากาศด้วยวิธีการถ่ายภาพได้ขนาดรัศมีความโค้งที่ปลายฟองเท่ากับ 3.25, 4.75, 7.5, 8.25, และ 11 mm ตามลำดับ สำหรับขนาดของลูกปัดที่เป็นแม่พิมพ์ดังกล่าวข้างต้น

3.1.1.4 การดำเนินการทดลองและวิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทำการทดลอง จะเริ่มจากการติดตั้งแบบจำลองฟองอากาศบนฐานรางเลื่อนโดยปรับให้ลำเลเซอร์เคลื่อนที่ผ่านตรงกลางยอดของแบบจำลองฟองอากาศพอดี และทำการติดตั้งกล้องบันทึกวีดีโอที่มีความเร็ว 30 เฟรมต่อวินาที หลังจากนั้นทำการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ให้ได้ค่าที่ต้องการ เมื่อเลื่อนแบบจำลองฟองอากาศออกไปติดกับลำเลเซอร์ให้บันทึกวีดีโอและค่าความต่างศักย์จากวงจรโฟโตไดโอดไปพร้อมกัน จะทำให้สามารถทราบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเลเซอร์ที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอดจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้า และความเร็วของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศไปพร้อม ๆ กันได้ รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์วัดและแบบจำลองฟองอากาศซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3.1 (ก) เพียงแต่ใช้เลเซอร์เพียงชุดเดียวในการทำการสอบเทียบ



รูปที่ 3.4 แบบจำลองของฟองอากาศที่ใช้ในการทดลอง; (ก)-(ข) ลักษณะโครงสร้างแบบจำลองฟองอากาศ, (ค)-(ง) การติดตั้งแบบจำลองฟองอากาศในการทดลองสอบเทียบ



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายอุปกรณ์การทดลองซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองฟองอากาศ เลเซอร์และโฟโตไดโอด และฐานรางเลื่อนที่ควบคุมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า



ในเบื้องต้นความเร็วของการเคลื่อนที่สำหรับแต่ละขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนไปสู่มอเตอร์เมื่อติดตั้งแบบจำลองฟองอากาศที่มีขนาดต่างกันได้ทำการสอบเทียบก่อน ผลการสอบเทียบที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 6, 9, 12, และ 16 โวลต์แสดงในรูปที่ 3.6 โดยขนาดความเร็วหาจากการหารระยะห่างระหว่างจุดเดียวกันของแบบจำลองฟองอากาศบนรูปภาพสองรูปที่ต่อเนื่องกันที่ถูกบันทึกด้วยอัตราเร็ว 30 เฟรมต่อวินาที ซึ่งจะทำให้คำนวณหาขนาดความเร็วได้ ภาพถ่ายในรูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายที่แสดงลำดับของการเคลื่อนที่ที่ต่อเนื่องกันของแบบจำลองฟองอากาศ สำหรับกรณีที่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 6 โวลต์ โดยเรียงลำดับจาก ก-ณ โดยแต่ละรูปจะมีเวลาต่างกัน 1/30 วินาที วิธีการวัดความเร็วดังกล่าวมีความผิดพลาดไม่เกิน 9% สำหรับทุกกรณีที่ทำการทดลอง โดยความผิดพลาดนั้นพิจารณาจากความแปรปรวนของขนาดความเร็วที่คำนวณได้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ต่อเนื่องกันโดยส่วนใหญ่ความแปรปรวนนี้จะมีค่าไม่เกิน 5% ยกเว้นกรณีที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 16 โวลต์ซึ่งมีความเร็วในการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศสูงและมีผลทำให้กล้องไม่สามารถบันทึกภาพได้ทัน

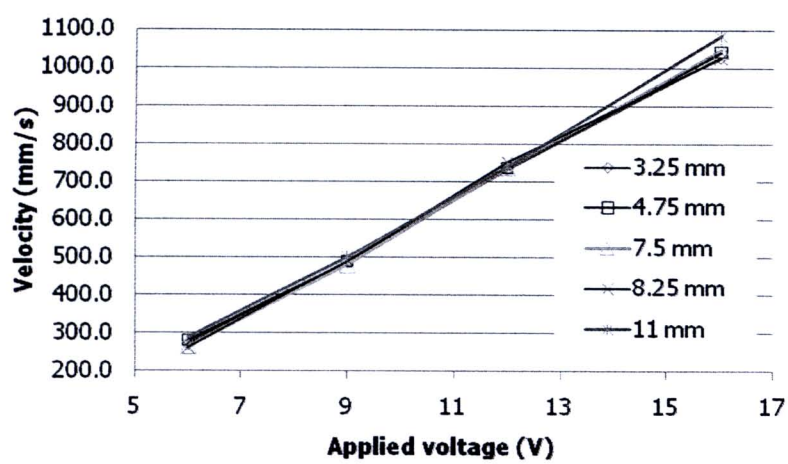
จากผลการทดลองของทุกขนาดแบบจำลองฟองอากาศ พบว่าความเร็ว (V) เพิ่มขึ้นจากประมาณ 270, 490, 740 ไปถึง 1045 mm/s ในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า 6, 9, 12 และ 16 โวลต์ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเร็วค่อนข้างจะแปรผันตามความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนสู่มอเตอร์เป็นเชิงเส้นตรง โดยแต่ละขนาดแบบจำลองฟองอากาศจะมีความเร็วต่างกันเพียงเล็กน้อย จากการทดลองพบว่าความเร็วแตกต่างกันไม่เกิน 4% ซึ่งความแตกต่างนี้น้อยมาก

หลังจากนั้นจึงทำการทดลองโดยใช้เลเซอร์ไดโอดไปตรวจสอบลักษณะสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรโฟโตไดโอดในแต่ละกรณี โดยนำแบบจำลองไปติดตั้งและเลื่อนแบบจำลองให้ติดกับลำเลเซอร์ด้วยความเร็วคงที่ต่าง ๆ กัน เมื่อแบบจำลองฟองอากาศเคลื่อนที่ติดกับลำเลเซอร์จะทำให้ทิศทางของเลเซอร์เปลี่ยนแปลงออกไปจากแนวที่จะกระทบกับเซนเซอร์ของโฟโตไดโอด โดยทำให้ขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้ามีขนาดลดลงดังแสดงตัวอย่างของกรณีแบบจำลองฟองอากาศขนาดรัศมีความโค้ง 3.25 mm เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่าง ๆ กันตัดลำแสงเลเซอร์ในรูปที่ 3.8 โดยแกนนอนแสดงเวลาและแกนตั้งแสดง Normalized voltage จากตำแหน่งปลายยอดฟองไปถึงตำแหน่งที่ทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอดลดลงเป็นศูนย์ โดย Normalized voltage สามารถคำนวณได้จากการนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งใด ๆ หารด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าก่อนที่เลเซอร์จะตัดผ่านฟองอากาศ สำหรับการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าได้คิดไว้ที่ 2% ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดหรือคิดเป็น 4 เท่าของ noise ในการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งค่า noise มีค่าประมาณ 0.5%

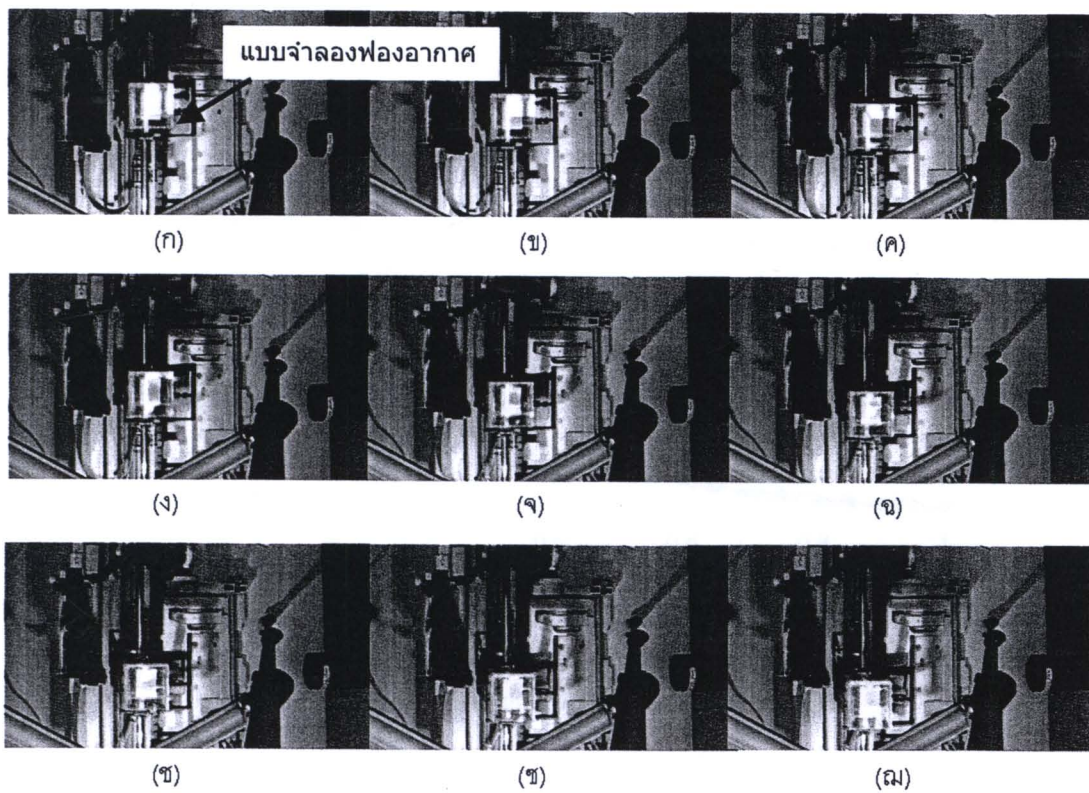
จากผลการทดลองพบว่า การลดลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอดจะลดลงค่อนข้างเร็วในช่วงต้นและจะค่อย ๆ ช้าลงในช่วงท้ายสำหรับทุกความเร็วของการเคลื่อนที่ เมื่อความต่างศักย์ที่ใช้ขับเคลื่อนสูงขึ้นแบบจำลองฟองอากาศก็เคลื่อนที่เร็วขึ้น ส่งผลทำให้ความต่างศักย์ลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ในเวลา (T_0) ที่สั้นลงด้วย

รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ที่ใช้ช่วงเวลาที่ความต่างศักย์ลดลงจนเป็นศูนย์ไปหารเวลาแต่ละช่วง โดยจะเรียกเทอมนี้ว่า "Time fraction" หรือ T/T_0 จากกราฟพบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงค่อนข้างเร็วในช่วงต้นและลดลงอย่างช้า ๆ ในช่วงหลัง โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะลดลงถึง 50% ในช่วงเพียง

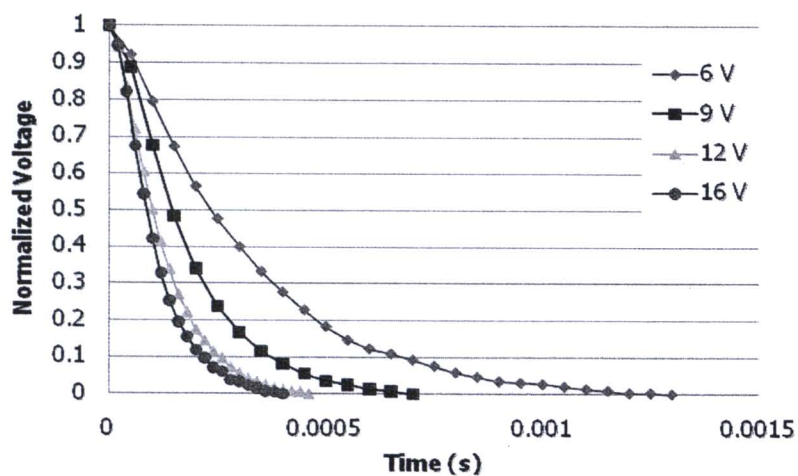
20% ของช่วงเวลาทั้งหมดในตอนต้น และในตอนท้ายจะเห็นว่าการลดลงของค่าความต่างศักย์เพียง 10% กลับต้องใช้ระยะเวลาถึงประมาณ 60% ของช่วงเวลาทั้งหมด โดยผลการทดลองในส่วนนี้ สอดคล้องกับผลการทดลองแบบสถิตในปีแรก (รูปที่ 3.10ก นำมาจากกราฟรูปที่ 3.20 ในรายงานปีแรก) ซึ่งบ่งชี้ว่าที่ทุก ๆ ความเร็วของการเคลื่อนที่ที่คงที่นี้ การหักเหของลำเลเซอร์บนตำแหน่งต่าง ๆ บนแบบจำลองฟองอากาศจะสอดคล้องกันหมดทำให้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Time fraction สอดคล้องกันหมดสำหรับทุกขนาดความเร็ว



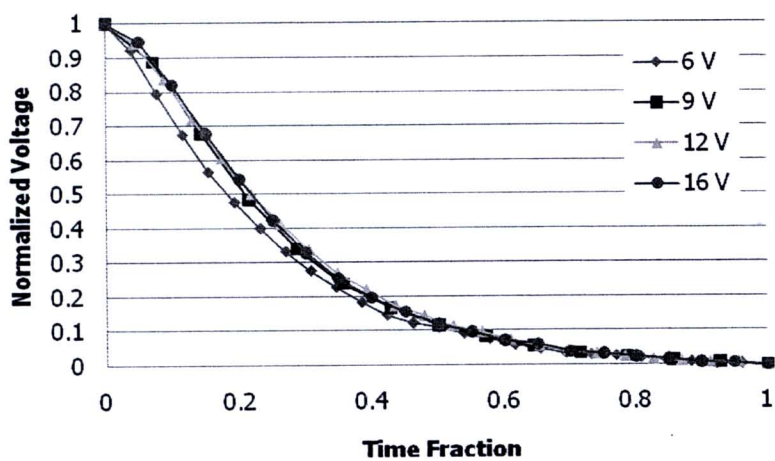
รูปที่ 3.6 ความเร็วของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศของทุกกรณีที่มีความต่างศักย์
ต่างๆ



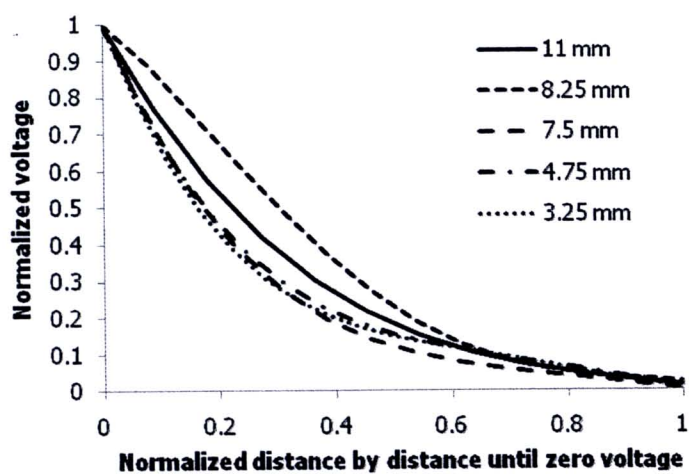
รูปที่ 3.7 ลำดับภาพถ่ายการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศจากด้านบน (30 เฟรมต่อวินาที)



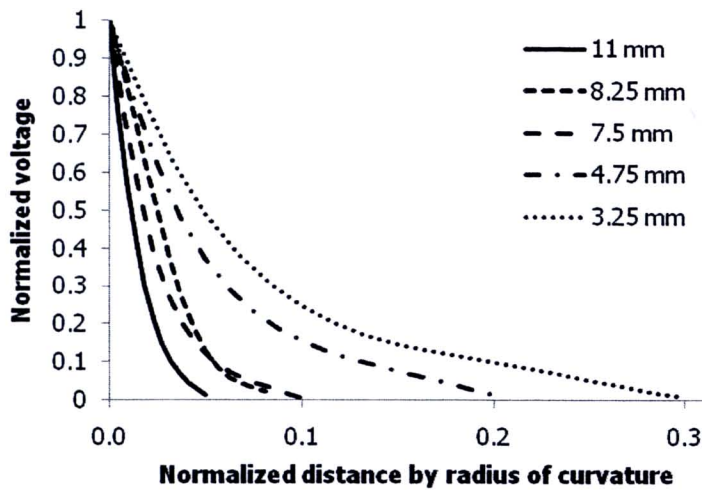
รูปที่ 3.8 การลดลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากอุปกรณ์วัดเมื่อป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาดต่างๆไปสู่มอเตอร์ สำหรับแบบจำลองฟองอากาศที่มีรัศมีความโค้ง 3.25 mm



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Time fraction สำหรับแบบจำลองฟองอากาศที่มีรัศมีความโค้ง 3.25 mm



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.10 ผลการทดลองจากการสอบเทียบแบบสถิตจากการศึกษาในปีที่หนึ่ง; (ก) Normalized voltage VS Normalized distance ด้วยระยะทางจนความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงเป็นศูนย์, (ข) Normalized voltage VS Normalized distance ด้วยขนาดของรัศมีความโค้ง

หากนำเอาข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าของกรณีรัศมีความโค้งเท่ากับ 3.25 mm มาวิเคราะห์ในอีกลักษณะหนึ่งคือ นำเวลามาคูณด้วยความเร็วของการเคลื่อนที่และหารด้วยขนาดของรัศมีความโค้ง โดยเรียกเทอมนี้ว่า “Normalized time” หรือ $(T \times V)/R$ โดยแสดงผลในรูปที่ 3.11 พารามิเตอร์นี้จะเป็นการบ่งชี้ถึงระยะทางที่ลำแสงเลเซอร์หักเหออกไปจากทิศทางเดิมจนทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอดลดลงจนเป็นศูนย์ โดยระยะทางนี้แสดงเป็นอัตราส่วนกับระยะรัศมีความโค้งของแบบจำลองฟองอากาศ ในการศึกษาในระยะที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอดลดลงจนเป็นศูนย์จะเป็นระยะประมาณ 0.1-0.12 เท่าของรัศมีความโค้ง ซึ่งจะสั้นกว่าผลการศึกษาแบบสถิตในปีแรก (รูปที่ 3.10 ข นำมาจากกราฟรูปที่ 3.19 ในรายงานปีแรก) ที่มีระยะประมาณ 0.3 เท่า ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนชนิดโฟโตไดโอดใหม่ โดยโฟโตไดโอดตัวใหม่มีมุมที่สามารถรับแสงได้แคบว่าประมาณ 2 เท่า ซึ่งก็ทำให้ระยะทางดังกล่าวสั้นลงประมาณ 2 เท่าเช่นเดียวกัน

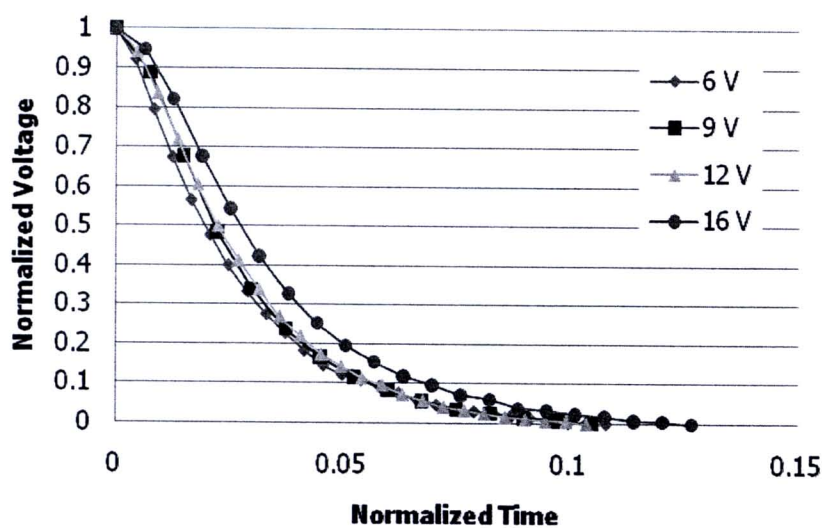
3.1.1.5 ผลการทดลองสำหรับแบบจำลองฟองอากาศในทุกกรณี

หลังจากนั้น การทดลองทุกกรณีได้ถูกวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกันนี้และนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างผลการทดลองทุกกรณี ผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์สำหรับ Normalized voltage และ Time fraction และความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Normalized time ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ

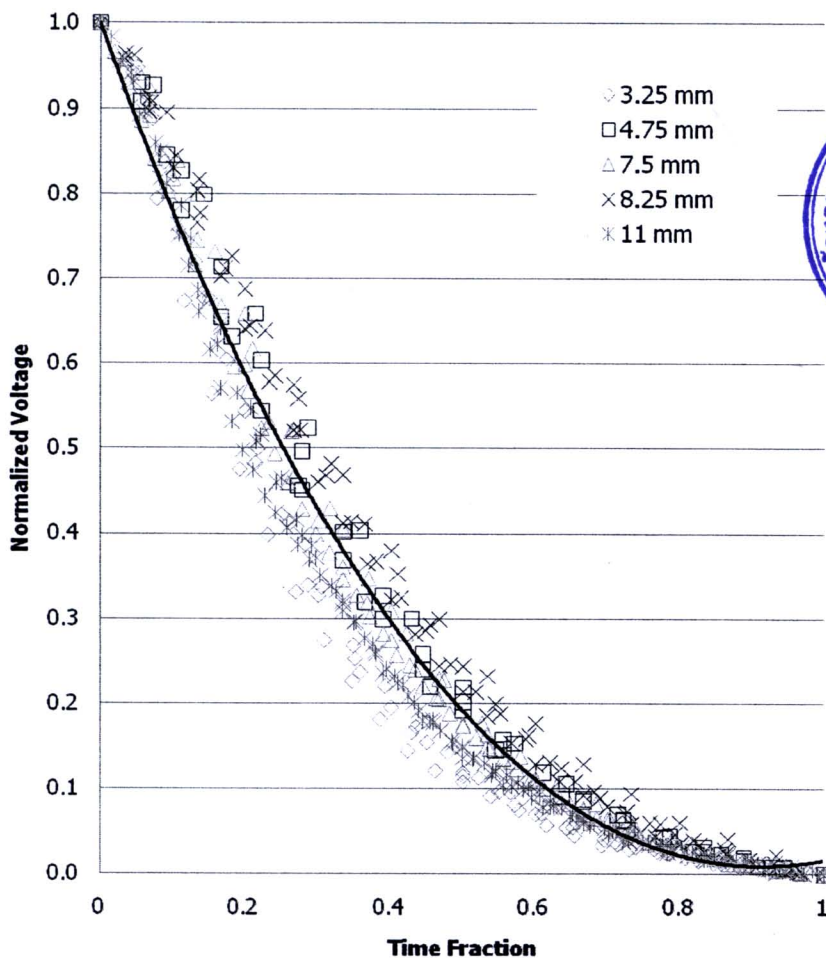
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Time fraction (รูปที่ 3.12) พบว่าลักษณะความสัมพันธ์ของทุกขนาดของแบบจำลองฟองอากาศจะให้ลักษณะแนวโน้มเดียวกัน โดยเส้นที่แสดง

แนวโน้มเฉลี่ยของทุกกรณี ซึ่งค่า Normalized voltage ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นและจะเริ่มช้าลงในช่วงท้าย โดยความต่างศักย์ลดลงประมาณ 50% ตั้งแต่ช่วงเวลาเพียง 20% ของเวลาทั้งหมด ในขณะที่ความต่างศักย์ลดลงถึง 10% ที่ช่วงเวลาประมาณ 60% ของช่วงเวลาทั้งหมด โดยความสัมพันธ์นี้ หากนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองแบบสถิตในปีแรก (รูปที่ 3.10ก) จะมีลักษณะที่สอดคล้องกัน ซึ่งบ่งชี้ว่าการหักเหของแสงบนผิวโค้งของฟองอากาศไม่ขึ้นกับความเร็วในการเคลื่อนที่โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ลำเลเซอร์ตกกระทบบนผิวโค้งเท่านั้น

ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่า เมื่อนำอุปกรณ์วัดไปวัดความเร็วของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่แล้ว ลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอดเมื่อนำมาวิเคราะห์แบบ normalization นี้ (สำหรับอัตราส่วนระหว่างรัศมีของลำเลเซอร์และฟองอากาศในช่วงของการทดลองนี้) จะมีลักษณะเดียวกันหมด และไม่สามารถแยกความแตกต่างของแต่ละกรณีทั้งขนาดของฟองอากาศและความเร็วของการเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Normalized time สำหรับแบบจำลองฟองอากาศที่มีรัศมีความโค้ง 3.25 mm

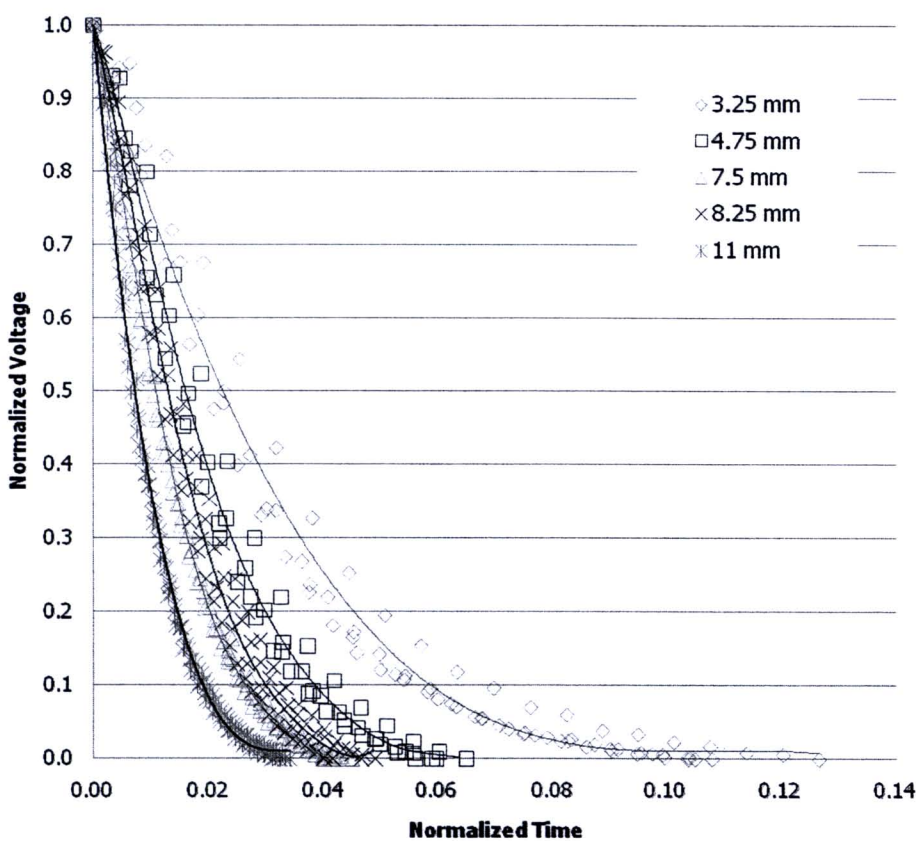


รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Time fraction สำหรับทุกขนาดแบบจำลองฟองอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ต่าง ๆ (variation ของ Normalized voltage = ± 0.1)

อย่างไรก็ตามจากความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Normalized time ในรูปที่ 3.13 บ่งชี้ว่าแบบจำลองที่มีขนาดรัศมีความโค้งเล็กจะมีลักษณะการลดลงของ Normalized voltage ช้ากว่าบนแกน Normalized time ในขณะที่ Normalized voltage ของแบบจำลองฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่จะลดลงบนแกน Normalized time เร็วกว่า ซึ่งผลการทดลองจะสอดคล้องกับการสอบเทียบแบบสถิตในปีแรกซึ่งบ่งชี้ว่าสาล์วเซอร์จะหักเหเบนผิวโค้งของแบบจำลองขนาดเล็กที่ตำแหน่งจากปลายยอดฟองได้ลึกกว่าจนถึงตำแหน่งที่สาล์วเซอร์ถูกหักเหเปลี่ยนทิศทางไปและมีทิศทางออกไปจากโฟโต้ไดโอดจนหมด ซึ่งผลการทดลองนี้สนับสนุนสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ในปีแรกเกี่ยวกับวิธีการนำอุปกรณ์วัดไปใช้งานซึ่งหากทราบรัศมีความโค้งของฟองอากาศแล้วอาจจะสามารถนำอุปกรณ์ไปวัดความเร็วของการเคลื่อนที่ได้

หรือในทางกลับกัน หากทราบความเร็วของการไหลแล้วอาจจะนำอุปกรณ์ไปใช้วัดขนาดของฟองอากาศได้เช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าผลการทดลองดังกล่าวอาจจะไม่สามารถอธิบายผลการทดลองของกรณีที่มีความโค้งของฟองอากาศขนาด 7.5 และ 8.25 mm ได้ ซึ่งผลการทดลองนี้ก็มีลักษณะเดียวกันในการทดลองแบบสถิตคือแบบจำลองขนาด 8.25 mm กลับมีการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าช้ากว่าขนาด 7.5 mm ซึ่งอาจจะเกิดจากการที่แบบจำลองฟองอากาศมีรัศมีความโค้งไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยอย่างที่กล่าวไว้ในตอนต้น หรือลักษณะของสัญญาณต่างกันน้อยมากและน้อยกว่า uncertainty ของการทดลอง



รูปที่ 3.13 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Normalized time สำหรับทุกขนาดแบบจำลองฟองอากาศและการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ต่าง ๆ

3.1.2 การสอบเทียบด้วยการเคลื่อนที่ที่มีความเร่ง

การศึกษาในส่วนนี้ใช้ตรวจสอบผลของความเร่งของการเคลื่อนที่โดยการสร้างการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งขึ้นมาและศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอด โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือชุดทดลองที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแล้วปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าให้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลา และชุดทดลองที่ใช้สปริงบนรางเลื่อนสร้างการเคลื่อนที่ โดยรายละเอียดของทั้งสองการทดลองมีดังนี้

3.1.2.1 การควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าของมอเตอร์เพื่อสร้างความเร่งของการเคลื่อนที่

ชุดทดลองในส่วนนี้เป็นชุดเดียวกับการทดลองด้วยความเร็วคงที่ที่กล่าวไปแล้ว แต่ในระหว่างทำการทดลองจะปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยการหมุนปุ่มปรับแรงดันไฟฟ้าในขณะที่แบบจำลองเคลื่อนที่อยู่ และทำการบันทึกสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอด พร้อมกับทำการบันทึกความต่างศักย์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ (แยกกราวด์ระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับออสซิลอสโคป) จะทำให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจากวงจรโฟโตไดโอดนั้นเป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วและความเร่งอย่างไรโดยดูจากอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้า (ความเร็วของการเคลื่อนที่แปรผันตรงตามความต่างศักย์ไฟฟ้า) อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ไม่สามารถปรับการเปลี่ยนสัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบอัตโนมัติได้จึงใช้การปรับด้วยมือหมุนปุ่มปรับและทำการทดลองหลายครั้งเพื่อให้ได้การทดลองหลายกรณี ซึ่งวิธีการนี้มีข้อจำกัดคือความเร่งที่สร้างได้ในขณะที่แบบจำลองเคลื่อนที่ติดล้อเลเซอร์มีขนาดที่ไม่สูงนัก

ในการทำการทดลอง ได้ศึกษากับแบบจำลองขนาด 3.25 และ 11 mm โดยได้ทำการทดลองหลายครั้งและนำค่าความต่างศักย์มาเปรียบเทียบกับระหว่างการทดลองที่มีความเร็วของการเคลื่อนที่คงที่และการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งแบบต่าง ๆ รูปที่ 3.14 แสดงผลการทดลองของกรณีที่มีความโค้งแบบจำลองฟองอากาศเท่ากับ 3.25 mm สำหรับการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วคงที่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าป้อนสู่มอเตอร์เท่ากับ 9 โวลต์ สำหรับผลการทดลองที่มีความเร่งมีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าประมาณ ± 1 และ ± 2 โวลต์ต่อวินาที หรือคิดเป็นค่าความเร่งประมาณ ± 0.1 และ $\pm 0.2 \text{ m/s}^2$ ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นขนาดของความเร่งที่น้อยมาก

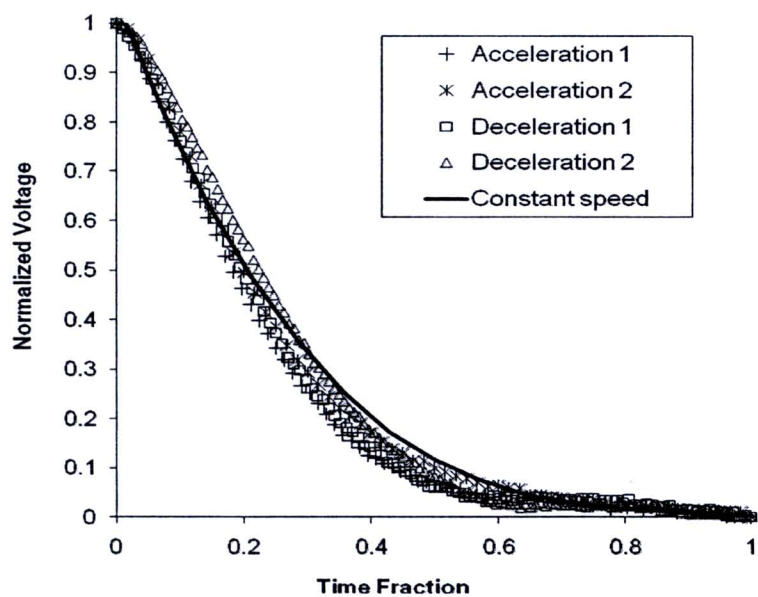
จากผลการทดลองทั้งสองพบว่าการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งจะมีลักษณะความสัมพันธ์ของ Normalized voltage และ Time fraction คล้ายกับกรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่โดยมีความแตกต่างของค่า Normalized voltage ประมาณ ± 0.05 ซึ่งผลการทดลองนี้แสดงความแตกต่างไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากความเร่งที่สร้างได้มีค่าไม่สูง และความเร่งดังกล่าวก็ไม่สามารถควบคุมให้สม่ำเสมอได้ส่งผลทำให้ลักษณะสัญญาณมีความแตกต่างกันในแต่ละการทดลอง

3.1.2.2 แบบจำลองสัญญาณจากวงจรโฟโตไดโอดสำหรับการเคลื่อนที่ที่มีความเร่ง

ดังนั้นในการศึกษาส่วนนี้จึงลองจำลองสัญญาณขึ้นมาเพื่อหาแนวโน้มของผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะของความเร่งของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรโฟโตไดโอด ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณเลเซอร์ที่ตกกระทบบน

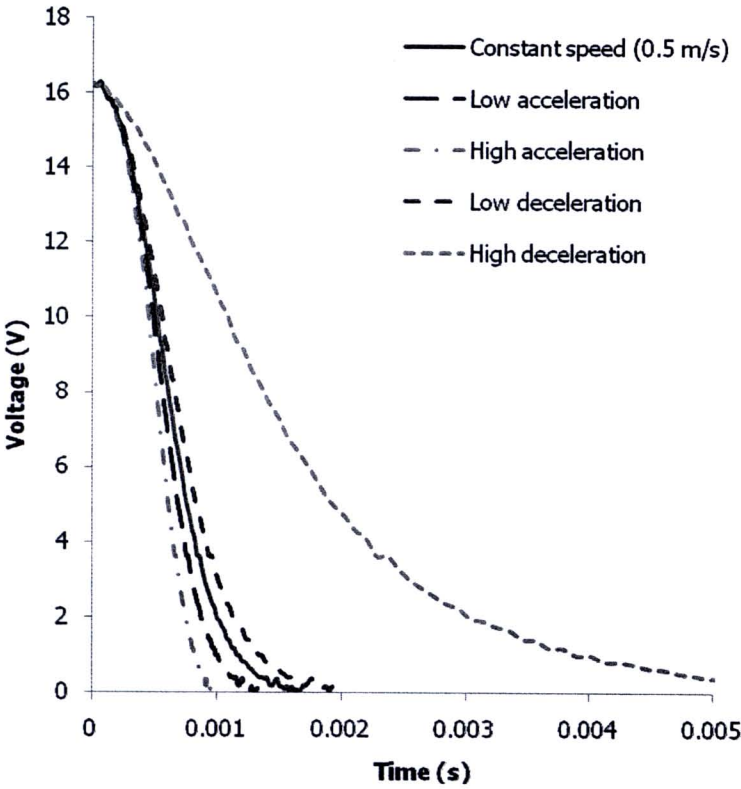
เซนเซอร์ของโฟโตไดโอด ในการศึกษาส่วนนี้ได้เลือกลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เก็บมาจากการทดลองที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ของแบบจำลองที่มีรัศมีความโค้ง 3.25 mm ก่อนหน้านี้ แล้วนำมาเปลี่ยนแปลงเวลาของสัญญาณเพื่อจำลองลักษณะของสัญญาณสำหรับการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งขึ้น โดยสัญญาณที่จำลองขึ้นมาแสดงในรูปที่ 3.15 หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์ให้เป็น Normalized voltage และ Time fraction ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยสัญญาณที่จำลองขึ้นมา มีขนาดความเร่งสองช่วงคือความเร่งและความหน่วงมีขนาดต่ำและสูง

จากการศึกษาพบว่าหากความเร่งและความหน่วงมีค่าต่ำกว่า 1 m/s^2 (low acceleration/deceleration) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ Normalized voltage และ Time fraction มีความใกล้เคียงกันกับสัญญาณของการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่มากซึ่งมีความแตกต่างโดยประมาณของค่า Normalized voltage น้อยกว่า 0.1 ส่งผลทำให้แยกความแตกต่างนี้ได้ยาก โดยเฉพาะหากเป็นสัญญาณที่เกิดจากการวัดจริงซึ่งมี noise อยู่ด้วย (variation ประมาณ ± 0.1 จากรูปที่ 3.12) อย่างไรก็ตามหากความเร่งและความหน่วงมีค่าสูงกว่า 10 m/s^2 (high acceleration/deceleration) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า จะมีความแตกต่างของสัญญาณ Normalized voltage จากกรณีที่แบบจำลองฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่สูงขึ้น โดยมีความแตกต่างมากกว่า 0.3 ซึ่งในการทดลองจริงผู้ทดลองจะสังเกตเห็นความแตกต่างของสัญญาณได้ง่ายขึ้น

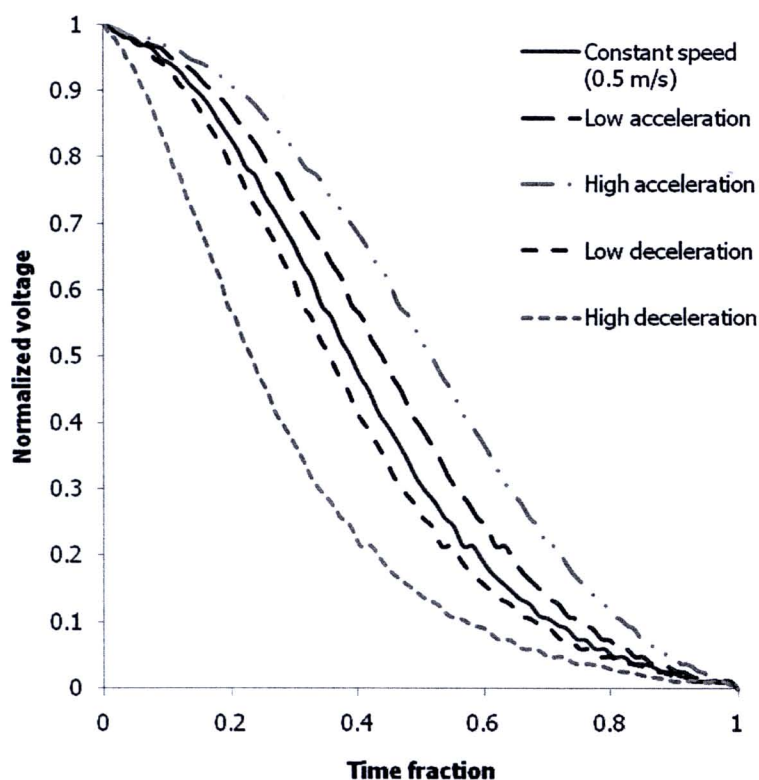


รูปที่ 3.14 Normalized voltage และ Time fraction สำหรับแบบจำลองฟองอากาศขนาด 3.25 mm ที่ควบคุมด้วยความความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่เปรียบเทียบกับกรณีที่เปลี่ยนแปลง ± 1 และ ± 2 Volt/s

ผลของการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสัญญาณดังกล่าวพบว่า การลดลงของสัญญาณของ Normalized voltage ต่อ Time fraction สำหรับกรณีเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจะช้ากว่ากรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ในทางกลับกันสำหรับการเคลื่อนที่ที่มีความหน่วงการลดลงของสัญญาณจะเร็วกว่าเมื่อความเร่งและความหน่วงมีขนาดมากขึ้นก็จะทำให้ความแตกต่างจากกรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่มากขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อนำอุปกรณ์ไปใช้วัดการไหลแล้วอุปกรณ์จะตรวจจับได้ว่าการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งหรือความหน่วงหรือไม่ รวมถึงความเร่งหรือความหน่วงดังกล่าวมีค่ามากหรือน้อยได้



รูปที่ 3.15 ลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จำลองขึ้นมาสำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง เปรียบเทียบกับสัญญาณเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่จากการทดลอง



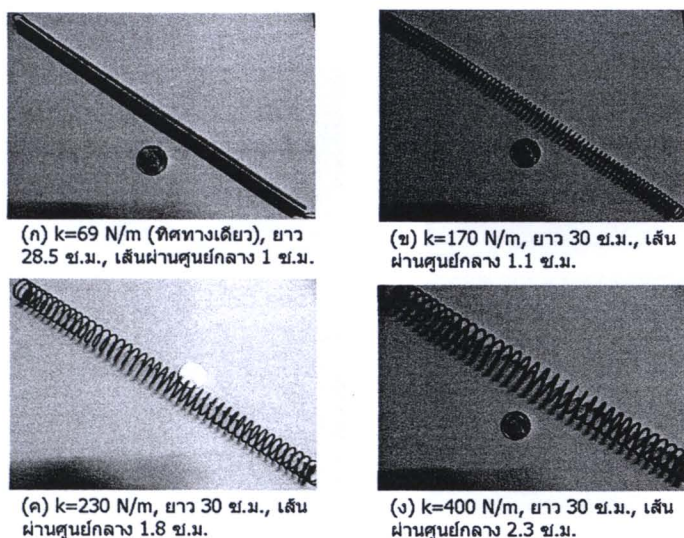
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ของ Normalized voltage และ Time fraction ของสัญญาณที่จำลองขึ้นมา สำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง เปรียบเทียบกับกรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่จากการทดลอง

3.1.2.3 การใช้ระบบสปริง

ในการศึกษานี้จึงจำเป็นต้องหาวิธีสร้างการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งสูงขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนความเร่งของการเคลื่อนที่จากชุดทดลองที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในส่วนที่ผ่านมาทำได้ลำบาก ถึงแม้จะมีเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าและ DC supply ที่ดีกว่านี้ก็อาจจะสร้างความเร่งที่มีขนาดสูงกว่า 10 m/s^2 ไม่ได้ เพราะว่าการเคลื่อนที่ของแบบจำลองอยู่ในช่วงเวลาเพียง 0.2 วินาทีในระยะทาง 30 cm และขนาดมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างเล็ก โดยหลักการหนึ่งที่สามารถสร้างการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งค่อนข้างสูงคือการใช้ระบบสปริงและมวลบนรางเลื่อนซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

หลักการในการเลือกสปริงมาใช้งานให้ได้ความเร็วและความเร่งที่ต้องการนั้นได้พิจารณาสมการ Hook's law สมการพลังงานศักย์ของสปริง และสมการการเคลื่อนที่ของนิวตันร่วมกับสมมติฐานว่าแรงเสียดทานระหว่างล้อและพื้นน้อยมาก ในการออกแบบชุดทดลองได้เปรียบเทียบกับสปริง 4 ลักษณะที่มี

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.17 แล้วทำการทดลองหาค่า stiffness ของสปริงทั้งหมดเพื่อประมาณค่าความเร็วและความเร่งที่จะเกิดขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่า สปริงทั้งสี่ลักษณะสามารถสร้างการเคลื่อนที่ในช่วงความเร็ว 0.5-2 m/s และความเร่งในช่วงสูงกว่า 10 m/s^2 ได้ (ภายใต้สภาวะที่กำหนด) ดังนั้นการเลือกใช้สปริงจึงยึดหลักกว่าใช้สปริงที่มีความสะดวกในการใช้งานมากที่สุด เมื่อพิจารณาความเหมาะสมในการใช้งาน จึงเลือกใช้สปริงแบบที่สาม (รูปที่ 3.17 ค) ซึ่งสามารถนำมาใช้สร้างเงื่อนไขของการทดลองตามที่ต้องการได้



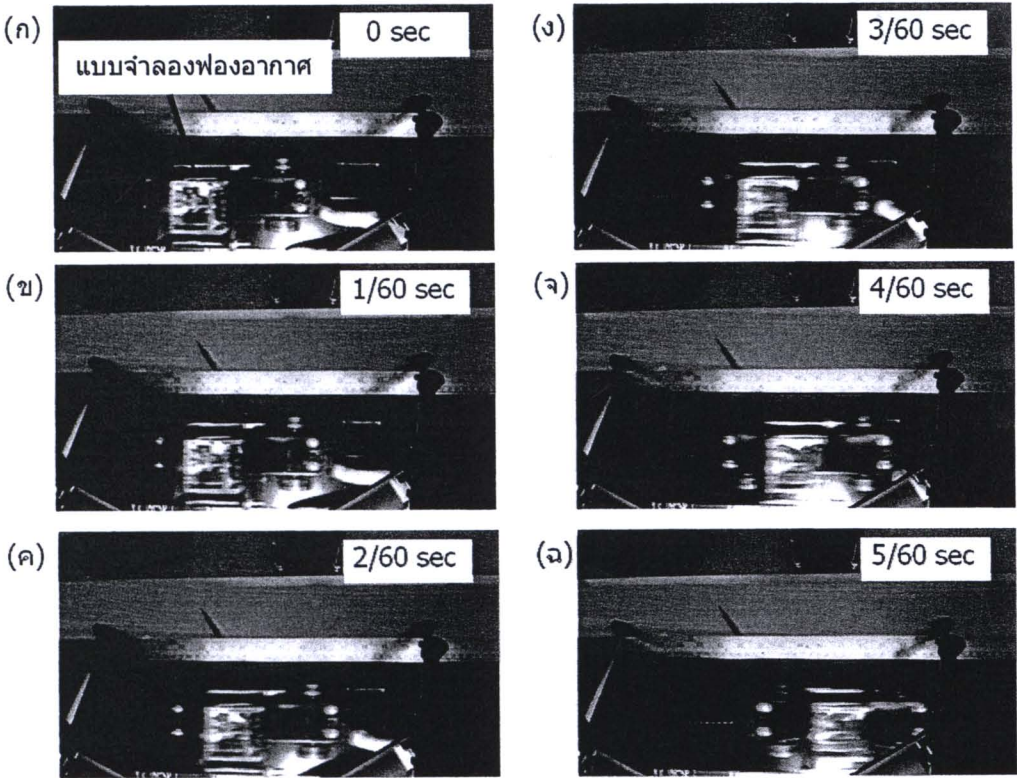
รูปที่ 3.17 สปริงขนาดและแบบต่าง ๆ และผลการทดลองวัดค่าคงที่สปริง (Spring stiffness, k)

ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาผลของความเร่งต่อลักษณะการลดลงของสัญญาณความต่างศักย์จากวงจรโฟโตไดโอดสำหรับขนาดของฟองอากาศที่รัศมีความโค้ง 3.25 และ 11 mm โดยชุดทดลองมีหลักการที่กล่าวไว้ตอนต้นและแสดงอยู่ในรูปที่ 3.1 ข ชุดทดลองจะเคลื่อนที่ได้ในระยะทางประมาณ 20 cm และมีฐานล้อเลื่อนที่สามารถติดตั้งแบบจำลองฟองอากาศได้ซึ่งเมื่อกดสปริงและปล่อยให้แบบจำลองเคลื่อนที่ออกมา ความเร่งของการเคลื่อนที่จะลดลงตามระยะการเคลื่อนที่ในลักษณะที่มีการลดลงอย่างคงที่

ในการทดลองนี้ได้ติดตั้งแบบจำลองอากาศและวัดการเคลื่อนที่ด้วยชุดเลเซอร์ที่ตำแหน่งตรงกลางของระยะเคลื่อนที่ (ระยะ 10 cm) พร้อมกับการบันทึกวิถีของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศเพื่อวัดความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 60 เฟรมต่อวินาที (กล้องคนละตัวกับการทดลองในส่วนแรก) หลังจากนั้นจะสามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าสำหรับการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งต่าง ๆ ได้ อย่างไรก็ตามจากการทดลองเบื้องต้นพบว่ากล้องวิดีโอที่อัตราเฟรม 60 เฟรมต่อวินาทียังไม่สามารถบันทึกได้อย่างเหมาะสมโดยในช่วงการเคลื่อนที่ดังกล่าวแบบจำลอง

ฟองอากาศใช้เวลาเคลื่อนที่เพียงประมาณ 0.2 วินาทีเท่านั้น ทำให้ภาพที่บันทึกได้มีประมาณ 10 รูปใน
 ระยะการเคลื่อนที่ดังกล่าวส่งผลให้การคำนวณขนาดความเร็วและความเร่งทำได้อย่างหยาบ ๆ เท่านั้น

ภาพตัวอย่างของการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.18 ซึ่งแสดงภาพต่อเนื่องของการทดลองสำหรับ
 แบบจำลองฟองขนาดรัศมีมีความโค้ง 11 mm โดยแต่ละเฟรมมีระยะเวลาห่างกัน 1/60 วินาที หลังจากนั้น
 จึงทำการหาค่าความเร็วและความเร่งโดยประมาณ ซึ่งพบว่ามีความเร่งเท่ากับ 10-20 m/s² ในทุก
 กรณีที่ทำการทดลอง

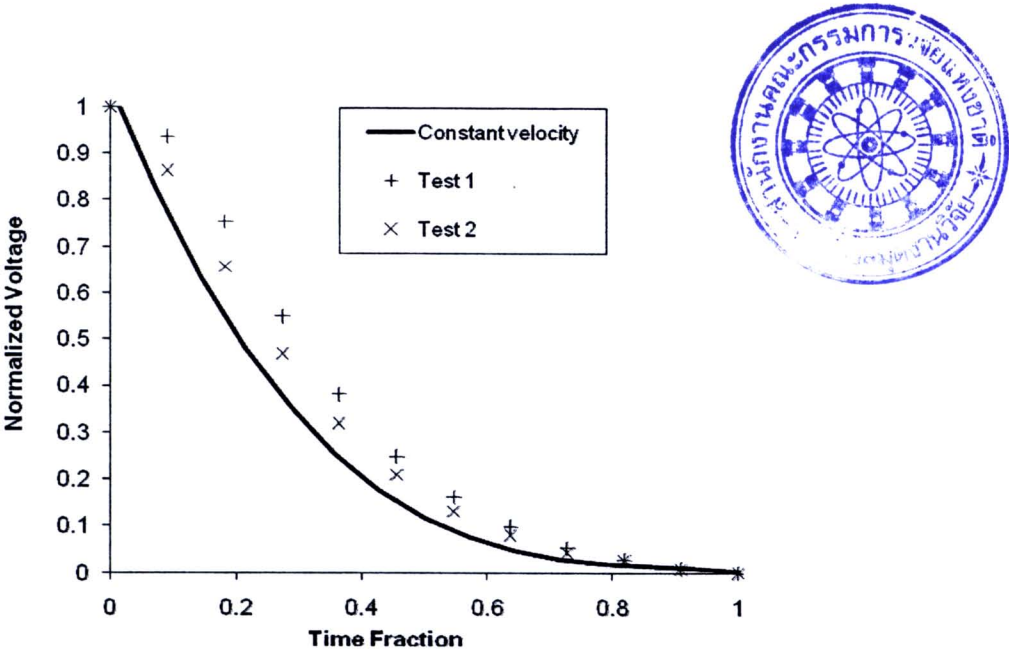


รูปที่ 3.18 ภาพแสดงลำดับการเคลื่อนที่ของล้อย่นที่บนรทุกแบบจำลองฟองอากาศมีขนาดรัศมี
 ความโค้ง 11 mm

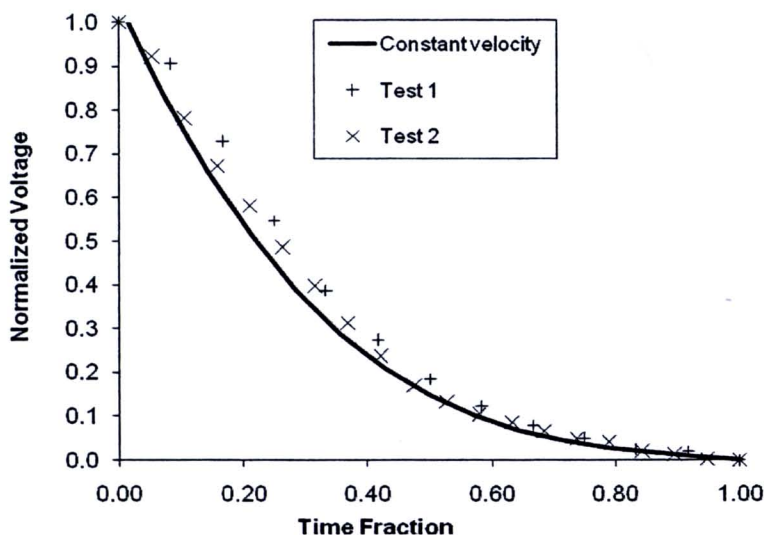
ผลการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.19 และ 3.20 โดยแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า
 Normalized voltage และ Time fraction ซึ่งจากกราฟทั้งสองจะเห็นว่าเมื่อแบบจำลองฟองอากาศ
 เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ลักษณะกราฟจะมีแนวโน้มต่างออกไปจากกรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่
 เล็กน้อย โดยที่ค่า Time fraction เดียวกันค่า Normalized voltage จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเป็นการเคลื่อนที่
 ด้วยความเร่ง และลักษณะแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับแบบจำลองที่แสดงไว้ในส่วนที่แล้ว ดังนั้นการ
 วัดด้วยระบบเลเซอร์ไดโอดนี้มีความเป็นไปได้สำหรับใช้วัดความเร็วของการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง
 ฟองอากาศได้หากทำการสอบเทียบได้ละเอียดพอ ในทางตรงกันข้ามการสอบเทียบในขณะนี้ยังทำได้ไม่

ดัดนัก เช่น ความสม่ำเสมอของรัศมีความโค้งของแบบจำลองอาจจะไม่ดีนัก การควบคุมความเร่งของการเคลื่อนที่ที่ยังสร้างแรงขนาดสูงมากไม่ได้ และการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของกล่องวิดีโอที่ไม่แม่นยำ เป็นต้น ซึ่งส่งผลทำให้ระบบในปัจจุบันอาจจะยังไม่สามารถวัดความเร่งของฟองอากาศที่แม่นยำได้ แต่ในเบื้องต้นระบบเลเซอร์ไดโอดนี้ยังใช้วัดตรวจสอบได้ว่าการเคลื่อนที่ของฟองอากาศเป็นการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งหรือความหน่วงหรือความเร็วคงที่ (ความเร่งหรือความหน่วงต่ำมาก) ได้

แนวทางที่จำเป็นสำหรับเพิ่มความแม่นยำในการสอบเทียบคือ การเพิ่มความสม่ำเสมอของรัศมีความโค้งของแบบจำลองฟองอากาศซึ่งอาจจะต้องเลือกใช้แม่พิมพ์ที่มีมาตรฐานสูงขึ้นรวมถึงการอบโพสเมอร์อาจจะต้องเลือกอุณหภูมิให้ต่ำลงเพื่อลดความเค้น (stress) จากผลของอุณหภูมิ การปรับปรุงระบบขับเคลื่อนแบบจำลองฟองอากาศให้สามารถสร้างแรงของการเคลื่อนที่สูง ๆ ได้ โดยใช้รางของการเคลื่อนที่ให้ยาวขึ้นและขนาดของมอเตอร์ใหญ่ขึ้น ซึ่งขนาดความเร่งควรจะมีความสูงกว่า 10 m/s^2 และในส่วนสุดท้ายคือการสอบเทียบความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ด้วยการบันทึกวิดีโอด้วยกล้องความเร็วสูงซึ่งอาจจะต้องมีความเร็วในการบันทึกเร็วกว่า 1,000 เฟรมต่อวินาที



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ของ Normalized voltage และ Time fraction สำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งโดยมีขนาดของรัศมีความโค้งเท่ากับ 3.25 mm เปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบที่ความเร็วคงที่



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ของ Normalized voltage และ Time fraction สำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วโดยมีขนาดของรัศมีความโค้งเท่ากับ 11 mm เปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบที่ความเร็วคงที่

3.2 การศึกษาวิธีการไหลของฟองอากาศจริง

การศึกษาในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเอาอุปกรณ์วัดที่ได้พัฒนาขึ้นมาลองใช้วัดการเคลื่อนที่ของฟองอากาศจริง โดยของเหลวที่ใช้คือกลีเซอรินซึ่งมีค่า reflective index เท่ากับ PDMS ที่เป็นโพลีเมอร์ที่ใช้ทำแบบจำลองฟองอากาศ โดยอากาศจากคอมเพรสเซอร์ถูกปล่อยออกจากท่อนอสเซลล์ที่เอียงทำมุม 45 องศา กับแนวระดับและปล่อยให้ลอยขึ้นในแนวตั้ง สำหรับเหตุผลของการใช้กลีเซอรินเพราะกลีเซอรินเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง และส่งผลทำให้การเคลื่อนที่ของฟองอากาศที่สร้างขึ้นไม่เร็วเกินกว่าความสามารถของกล้องวิดีโอแบบธรรมดาจะจับการเคลื่อนที่ได้ทัน

ชุดทดลองประกอบไปด้วยอ่างของเหลวทำจากกระจกหนา 4 mm มีขนาดภายในเป็น $10.3 \times 20.5 \times 17.0 \text{ cm}^3$ ท่อนอสเซลล์ทำจากสแตนเลสมีช่อง 90 องศา และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 mm โดยจะจุ่มให้ปลายของท่อนอสเซลล์ต่ำกว่าระดับผิวของเหลว 6 cm อีกด้านหนึ่งของท่อนอสเซลล์ต่อกับสายอากาศที่ต่อกับคอมเพรสเซอร์ มีวาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศ ในการทดลองนี้ได้จัดให้ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดกับเลเซอร์ห่างกัน 20 cm ผู้ทดลองได้จัดให้ลำเลเซอร์อยู่เหนือกว่าปากท่อนอสเซลล์เท่ากับ 6.7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของท่อนอสเซลล์ โดยรายละเอียดของชุดทดลองอ่านได้จากรายงานในปีแรก

นอกเหนือจากการใช้ระบบเลเซอร์ไดโอดวัดการไหลแล้ว ยังมีกล้องวิดีโอ และแหล่งกำเนิดแสงเพื่อใช้ในการถ่ายภาพ ซึ่งใช้เทคนิค back-light illumination ด้วยอัตราความเร็ว 25 เฟรมต่อวินาที โดยการ

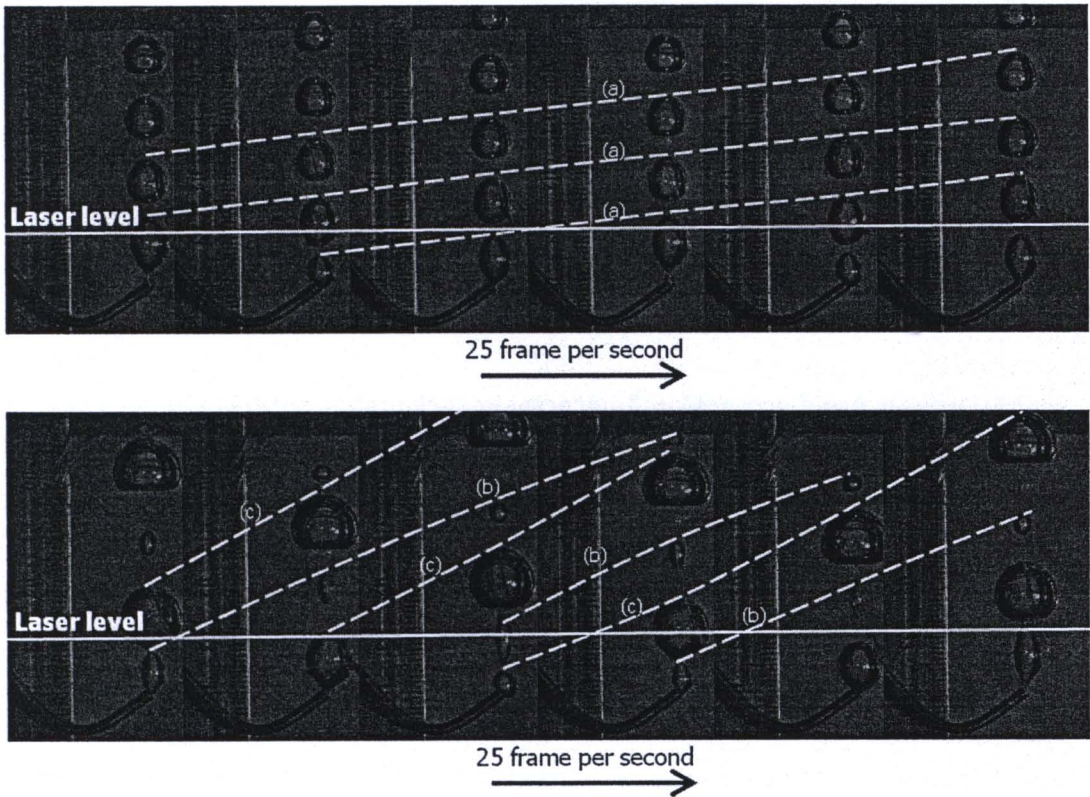
อาศัยภาพถ่ายนี้จะได้ข้อมูลของความเร็วและความเร่งเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศด้วยโดยการวัดระยะของฟองเดียวกันในคนละเฟรมที่ต่อเนื่องกันและหารด้วยระยะเวลาที่ใช้ในการถ่ายรูปทั้งสอง (0.04 วินาที) อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของการทดลองนี้จะค่อนข้างต่ำเพราะความเร็วของการถ่ายรูปไม่เร็วพอเมื่อเทียบกับความเร็วของการไหล โดยฟองอากาศที่ไหลออกมาจะมีลักษณะเป็นวงรี (ลูกรีบี้) วงรีที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างน้อย และทรงกลมเท่านั้น ซึ่งเกิดจากสภาวะการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.2

รูปที่ 3.21 แสดงภาพถ่ายจากกล้องวิดีโอที่แสดงภาพต่อเนื่องของการเคลื่อนที่ของฟองอากาศที่เกิดจากการปล่อยอากาศจากปากนอสเซลล์ด้วยอัตราเร็วต่าง ๆ กัน จากรูปจะเห็นได้ว่าสำหรับฟองอากาศลักษณะเป็นวงรี (ลูกรีบี้) และวงรีที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างน้อย เมื่อลากเส้นเชื่อมระหว่างปลายยอดฟองที่เวลาถัดไป (เส้น a และ b) สำหรับฟองอากาศถัดไปจะขนานกันซึ่งแสดงถึงกรณีที่มีความเร็วค่อนข้างจะไม่เปลี่ยนแปลงหรือมีความเร็วคงที่ ในถากลับกันเส้นดังกล่าวจะเฉียงออกจากกันเล็กน้อยสำหรับกรณีที่เป็นฟองทรงกลม (เส้น c) ซึ่งแสดงว่าเป็นการเคลื่อนที่ที่มีความเร่ง เมื่อลองคำนวณความเร่งของการเคลื่อนที่ในกรณีฟองอากาศแบบทรงกลมจากภาพถ่ายที่บันทึกไว้จะมีค่าความเร่งประมาณ (การประมาณค่าค่อนข้างหยาบเนื่องจากความเร็วในการบันทึกภาพค่อนข้างช้า) 4 m/s^2 โดยอีกสองกรณีจะมีความเร่งประมาณ 0 m/s^2

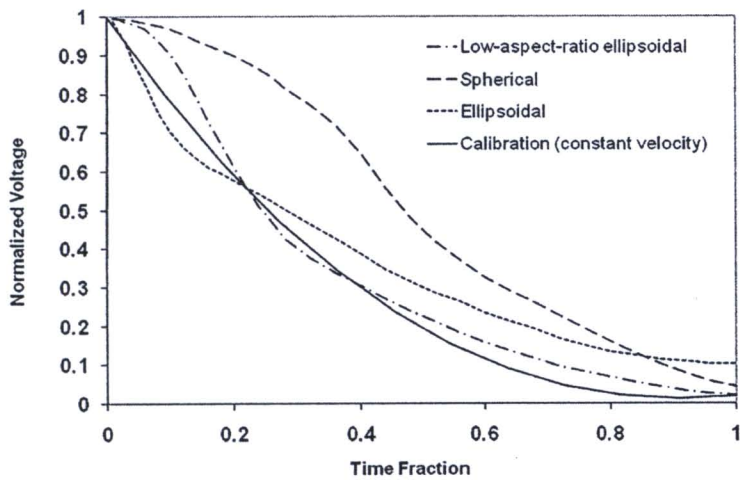
เมื่อนำเอาสัญญาณจากอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดมาวิเคราะห์และแสดงความสัมพันธ์เฉลี่ยระหว่าง Normalized voltage และ Time fraction และเปรียบเทียบกับผลที่ได้สอบเทียบด้วยความเร็วคงที่จากแบบจำลองฟองอากาศ ซึ่งกราฟแสดงการเปรียบเทียบได้แสดงไว้รูปที่ 3.22 โดยข้อมูลจากการทดลองมี variation ประมาณ ± 0.1 ซึ่งจะเห็นว่าผลของกรณีของฟองอากาศแบบทรงกลมจะมีความแตกต่างจากผลการสอบเทียบอย่างชัดเจน ในขณะที่ผลของสัญญาณจากกรณีฟองอากาศรูปร่างวงรี และวงรีที่มีอัตราส่วนน้อยจะใกล้เคียงกับผลการสอบเทียบด้วยความเร็วของการเคลื่อนที่คงที่ ซึ่งผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดนี้สามารถใช้ระบุได้ว่าฟองอากาศมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งหรือความเร็วคงที่ได้ อย่างไรก็ตามความเร่งนี้จะต้องมีขนาดค่อนข้างสูงโดยเฉพาะกรณีที่ noise ของอุปกรณ์และการสอบเทียบยังค่อนข้างมากอยู่

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดลองและรูปร่างฟองอากาศที่เกิดขึ้น

สภาวะที่	อัตราการไหลของอากาศ (l/m)	รูปร่างฟอง
1	0.24	วงรีที่มีอัตราส่วนน้อย
2	0.44	วงรี
3	0.44	ทรงกลม



รูปที่ 3.21 ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ; (บน) วงรีอัตราส่วนน้อย, (ล่าง) วงรีและทรงกลม



รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ Normalized voltage และ Time fraction สำหรับการทดลองต่าง ๆ

3.3 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาในปีนี้ได้เพิ่มเติมการสอบเทียบแบบพลวัตเพื่อตรวจสอบผลของการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วและความเร่งขนาดต่างๆ ต่อรูปร่างของสัญญาณจากอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอด ในการศึกษาได้จำลองฟองอากาศแบบครึ่งทรงกลมด้วยขนาดรัศมีมีความโค้งเท่ากับ 3.25, 4.75, 7.5, 8.25, และ 11 mm และจำลองความเร็วของการเคลื่อนที่ที่มีค่าในช่วงประมาณ 0.3-1 m/s และมีค่าความเร่งที่จำลองขึ้นมาอยู่ในสองช่วงคือ ค่าความเร่งมีค่าต่ำซึ่งน้อยกว่า 1 m/s^2 และมีค่าสูงอยู่ในช่วง $10\text{-}20 \text{ m/s}^2$ โดยใช้กล้องวิดีโอบันทึกการเคลื่อนที่ของแบบจำลองฟองอากาศจริงอย่างไรก็ตามกล้องวิดีโอดังกล่าวไม่สามารถวัดได้แม่นยำนัก เนื่องจากความเร็วในการบันทึกภาพค่อนข้างช้า

ผลการสอบเทียบสำหรับกรณีที่แบบจำลองฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งกระทำโดยการเลื่อนแบบจำลองด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า พบว่าลักษณะผลการทดลองของทุกขนาดของแบบจำลองฟองอากาศจะให้ลักษณะแนวโน้มเดียวกัน ซึ่งค่า Normalized voltage ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นและอัตราการลดลงจะต่ำลงในช่วงท้าย โดยความต่างศักย์ลดลงประมาณ 50% ตั้งแต่ช่วงเวลาเพียง 20% ของเวลาทั้งหมดในขณะที่ความต่างศักย์ลดลงถึง 10% ที่ช่วงเวลาประมาณ 60% ของช่วงเวลาทั้งหมด โดยความสัมพันธ์นี้สอดคล้องกับผลการทดลองแบบสถิตในปีแรก ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่าการหักเหของแสงบนผิวโค้งของฟองอากาศไม่ขึ้นกับความเร็วในการเคลื่อนที่โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ลำเลเซอร์ตกกระทบบนผิวโค้งเท่านั้น สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized voltage และ Normalized time พบว่าแบบจำลองที่มีขนาดรัศมีความโค้งเล็กจะมีลักษณะการลดลงของ Normalized voltage ช้ากว่าบนแกน Normalized time เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการสอบเทียบแบบสถิตในปีแรกเช่นกัน และบ่งชี้ว่าลำเลเซอร์จะหักเหบนผิวโค้งของแบบจำลองที่ตำแหน่งจากปลายยอดฟองได้ลึกกว่าจนถึงตำแหน่งที่ลำเลเซอร์ถูกหักเหเปลี่ยนทิศทางไปและมีทิศทางออกไปจากโฟโตไดโอดจนหมด

ผลการทดลองทั้งหมดนี้สนับสนุนสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ในปีแรกเกี่ยวกับวิธีการนำอุปกรณ์วัดไปใช้งาน ซึ่งหากทราบรัศมีความโค้งของฟองอากาศแล้ว อาจจะสามารถนำอุปกรณ์ไปวัดความเร็วของการเคลื่อนที่ได้ หรือในทางกลับกันหากทราบความเร็วของการไหลแล้ว อาจจะสามารถนำอุปกรณ์ไปใช้วัดขนาดรัศมีความโค้งของฟองอากาศได้

สำหรับการสอบเทียบความเร่งของการเคลื่อนที่ด้วยการใช้ระบบสปริงและรางเลื่อนพบว่า เมื่อแบบจำลองฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ลักษณะผลการทดลองจะมีแนวโน้มต่างออกไปจากกรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เล็กน้อย โดยที่ค่า Time fraction เดียวกันค่า Normalized voltage จะมีค่าสูงขึ้นสำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ในการศึกษาแบบจำลองสัญญาณจากอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดสำหรับการเคลื่อนที่ที่มีความเร่งและความหน่วงพบว่า สำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจะลดลงช้ากว่ากรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ในทางกลับกันเมื่อแบบจำลองฟองอากาศเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงลักษณะของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าจะลดลงเร็วกว่า อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาของแบบจำลองสัญญาณและผลการสอบเทียบจริงพบว่า ขนาดของ

ความเร่งจะต้องมีขนาดค่อนข้างสูงจึงจะสามารถถูกตรวจสอบความเร่งนี้ด้วยอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดได้ และขนาดความเร่งของการฟองอากาศควรมีค่าสูงกว่า 10 m/s^2

ในส่วนสุดท้ายได้นำเอาอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดมาวัดการไหลของฟองอากาศจริงซึ่งเป็นการสร้างการไหลจากการอัดอากาศและปล่อยผ่านหัวนอสเซลล์ในภาชนะที่บรรจุลิเธียม พบว่าอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอดที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ตรวจสอบว่า ฟองอากาศกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร่งหรือกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ได้ ในการศึกษาเบื้องต้นนี้มีแนวทางเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการสอบเทียบ ดังนี้ ส่วนแรกคือการเพิ่มความสม่ำเสมอของรัศมีความโค้งของแบบจำลองฟองอากาศซึ่งอาจจะต้องเลือกแบบหล่อที่มีมาตรฐานสูงขึ้นรวมถึงการอบโพสเมอร์อาจจะต้องเลือกอุณหภูมิให้ต่ำลงเพื่อลดความเค้น (stress) จากผลของอุณหภูมิเพื่อทำให้รัศมีความโค้งสม่ำเสมอขึ้น การปรับปรุงระบบขับเคลื่อนแบบจำลองฟองอากาศให้สามารถสร้างความเร่งของการเคลื่อนที่ให้สูงกว่าที่เป็นอยู่ในปัจจุบันได้ โดยการใช้รางของการเคลื่อนที่ให้ยาวขึ้นและขนาดของมอเตอร์ใหญ่ขึ้น ซึ่งขนาดความเร่งของการเคลื่อนที่นั้นควรมีค่าสูงกว่า 10 m/s^2 และในส่วนสุดท้ายคือการสอบเทียบความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ด้วยการบันทึกวิดีโอด้วยกล้องความเร็วสูงซึ่งอาจจะต้องมีความเร็วในการบันทึกเร็วกว่า 1,000 เฟรมต่อวินาที