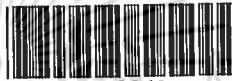


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วิธีการจำลอง และการทดลองเพื่อการวัดพฤติกรรมเชิงพลวัต
สำหรับการไหลในของเหลว

SIMULATION AND EXPERIMENTAL METHODS FOR THE MEASUREMENT
OF FLUID FLOW DYNAMICS BEHAVIOR



T123042

วรารัตน์ เลิศกิตติวัฒน์กุล

WARARAT LERTKITTIWATTANAKUL

อ.พ.

๑๖๖๖

๒๕๕๕

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

123042

18 ต.ค. 2555

b. 123042
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-EN-M-040-091

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SIMULATION AND EXPERIMENTAL METHODS FOR THE
MEASUREMENT OF FLUID FLOW DYNAMICS BEHAVIOR**



WARARAT LERTKITTIWATTANAKUL

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012
KMUTL-2012-EN-M-040-091**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วิธีการจำลอง และการทดลองเพื่อการวัดพฤติกรรมเชิงพลวัตสำหรับการไหลในของเหลว
Thesis Title SIMULATION AND EXPERIMENTAL METHODS FOR THE MEASUREMENT OF FLUID FLOW DYNAMICS BEHAVIOR
นักศึกษา นางสาววรารัตน์ เลิศกิตติวัฒนกุล
รหัสประจำตัว 51060415
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ศิริเดช บุญแสง
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-EN-M-040-091

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ	จิตรุ่งเรือง	
รศ.ดร.สมศักดิ์	ชุมช่วย	
รศ.ดร.อฉิม	ฤกษ์บุตร	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ผศ.ดร.ศิริเดช	บุญแสง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 เวลา 14.00 – 16.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร.สุขขีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วิธีการจำลอง และการทดลองเพื่อการวัด พฤติกรรมเชิงพลวัตของการไหลของของเหลว
นักศึกษา	นางสาววรารัตน์ เลิศกิตติวัฒน์กุล
รหัสนักศึกษา	51060415
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ศิริเดช บุญแสง

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอวิธีการศึกษาและวัดพฤติกรรมเชิงพลวัตของหยดของเหลว การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การศึกษาลักษณะการฟอร์มตัวของหยดของเหลวบนพื้นผิว และพฤติกรรมเชิงพลวัตที่เวลาใดๆ ของหยดของเหลวโดยการใช้โปรแกรม surface evolver เพื่อจำลองลักษณะการฟอร์มตัวบนพื้นผิวของหยดของเหลวภายใต้เงื่อนไขต่างๆ เช่น ค่ามุมเปียก ปริมาตร และแรงตึงผิว เป็นต้น โดยได้ยกตัวอย่างการนำไปใช้เพื่อการวิเคราะห์ตัวแปรและค่าของตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดโซลเดอ์บริดจ์จากการเชื่อมกันทางไฟฟ้าระหว่างคู่ของสไลเดอร์และซัสเพนชันแพดที่อยู่ติดกันในบริเวณส่วนของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ โดยการทดลองเปลี่ยนค่ามุมเปียกบนสไลเดอร์และ/หรือซัสเพนชัน พร้อมทั้งการหาค่าปริมาตรวิกฤตที่ทำให้เกิดโซลเดอ์บริดจ์ จากผลการทดลองพบว่า ค่าปริมาตรวิกฤตลดลงเมื่อมุมเปียกเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ความสามารถในการยึดเกาะพื้นผิวของตะกั่วลดลง ดังนั้นตะกั่วจึงไหลออกทางด้านข้างทำให้เกิดโซลเดอ์บริดจ์ได้ง่ายกว่ากรณีที่มีมุมเปียกมีค่าน้อย และเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดโซลเดอ์บริดจ์ ค่าปริมาตรตะกั่วควรที่ใช้ควรจะน้อยกว่าค่าปริมาตรตะกั่ววิกฤตที่มีมุมเปียกนั้นๆ

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตได้ศึกษาโดยใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยเทคนิคแฟลชโฟโตกราฟี โดยมีหลักการสำคัญคือ การควบคุมช่วงเวลาการถ่ายภาพและปล่อยแสงแฟลชให้มีความสอดคล้องกันโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการถ่ายภาพที่เวลาใดๆ ผลจากการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตแสดงให้เห็นว่า หลังจากที่ยอดน้ำตกกระทบพื้นแล้วจะมีลักษณะคล้ายกับคลื่นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ค่ามุมเปียกสุดท้ายระหว่างหยดน้ำกับแผ่น PCB มีค่าประมาณ 80° ซึ่งที่มุมเปียกค่านี้น้ำยังสามารถยึดเกาะอยู่บนพื้นผิว PCB ได้ นอกจากนี้สามารถนำวิธีการถ่ายภาพด้วยแฟลชโฟโตกราฟีนี้ไปใช้สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการหาอัตราการไหลเพื่อควบคุมขนาดหยดของเหลวให้คงที่ โดยทำการทดลองหาอัตราการไหลของของเหลว 2 ชนิด คือ น้ำหวานซึ่งเป็นตัวแทนของเหลวชนิด non-Newtonian fluid และน้ำมันมะกอกซึ่งเป็นของเหลวประเภท Newtonian fluid และ

ทำการทดลองเพื่อหาค่าอัตราการใช้ของของเหลวที่เหลืออยู่ภายในกระบอกหยดระดับต่างๆ ผลจากการทดลองพบว่า เมื่อระดับของเหลวลดลง อัตราการใช้จะเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพารามิเตอร์ N และ K ใดๆ มีค่าเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการควบคุมระบบหยดของเหลวให้มีความแม่นยำจำเป็นต้องคำนึงถึงชนิดของของเหลวที่ใช้ และระดับของเหลวที่เหลืออยู่ในกระบอกหยด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Simulation and Experimental Methods for the Measurement of Fluid Flow Dynamics Behavior
Student	Miss Wararat Lertkittiwattanakul
Student ID	51060415
Degree	Master of Engineering
Program	Electronics Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Siridech Boonsang

Abstract

This thesis presents the measurement methods for the fluid flow dynamics behavior by using the simulation and experimental setup. The surface evolver is an interactive program for the study of surfaces shaped by the surface tension and other energies. To use the surface evolver for analyzing, the factor effects the solder joint bridge between a couple of slider and suspension in read/write head is a case study. To validated the simulate results, the actual solder bridge image are compared and described as a percentage of the error. The results show that the solder volume should be smaller than the critical volume to avoid the solder bridge. In addition the validated result demonstrates that the initial model is only accepted for the prediction of solder bridge with the image from a microscope in the case of cross_section image(II) -cross_section image(V) but cross_section image(I) is not.

A flash photography technique is used to study the fluid flow dynamics behavior of droplets. The principle idea is the synchronized between image capturing and flash exposure time. The results show that the dynamics behavior look like a wave in order of 10 ms. The wetting angle of droplet is about 80° implies that droplet can wet on a PCB surface. Furthermore, the flash photography technique is also apply for finding the volume flow rate of syrup. In the General Power-law equation, N and K are parameter need to be computed for a precise droplet control. The droplet flow rate increases while the fluid level decreases that is similar to N and K . Therefore, to control droplet precisely, the type and level of a residual fluid in a syringe should be account.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณ ดร.ศิริเดช บุญแสง เป็นอย่างสูง วิทยานิพนธ์นี้จะไม่วันสำเร็จลงได้ถ้าฉันไม่ได้รับคำแนะนำ ความเอาใจใส่ห่วงใย และเคี่ยวเข็ญมาโดยตลอดจากอาจารย์ที่ปรึกษาท่านนี้

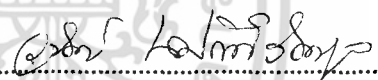
ขอบคุณครู อาจารย์ทุกท่านที่มีความมุ่งมั่นให้ความรู้ การอบรมสั่งสอนซึ่งเป็นสมบัติที่มีค่าอยู่กับตัวไม่มีวันหมด

ขอบคุณผู้ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ทุกภาคส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง I/U CRC in Data Storage Technology and Application(DSTAR), Western Digital and National Science and Technology Development Agency(NSTDA)

ขอบคุณพ่อ แม่ที่ให้ความเชื่อมั่นและไว้วางใจเสมอมา รวมถึงญาติพี่น้อง เพื่อนสนิทมิตรสหายที่เป็นกำลังใจทั้งยามสุข ทุกข์

สุดท้ายไม่มีวันลืมเจ้าต๋อบสี่ทอง และสี่เงินผู้ซื่อสัตย์และเล่นซุกซน ซึ่งเป็นสมาชิกน้องใหม่ในครอบครัวของฉัน “ขอบใจมากนะ...สี่ทอง สี่เงิน”

ขอบคุณค่ะ



(วารรัตน์ เลิศกิตติวัฒนกุล)

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
สารบัญสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งมั่นและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	4
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	5
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	7
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณสมบัติของของไหล.....	7
2.1.1 แรงตึงผิว(surface tension).....	7
2.1.2 ความหนืด(viscosity).....	11
2.2 พื้นฐานการใช้งานโปรแกรม surface evolver.....	16
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้โปรแกรม surface evolver.....	18
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคนิคแฟลชโฟโตกราฟีเพื่อการศึกษา พฤติกรรมเชิงพลวัตของของไหล.....	22
2.3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าพารามิเตอร์ของของเหลว เพื่อควบคุมขนาดหยดของเหลว.....	28
2.3.4 งานวิจัยที่นำเสนอการหาค่าปริมาตรหยดของเหลว.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การจำลองลักษณะหยดของเหลวบนพื้นผิว และตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในงานฮาร์ดดิสก์ ด้วยโปรแกรม surface evolver.....	37
3.1 การจำลองลักษณะหยดของเหลวบนพื้นผิวด้วยโปรแกรม surface evolver.....	37
3.1.1 วิธีการทดลอง.....	37
3.1.2 ผลการทดลองการศึกษาลักษณะหยดของเหลวบนพื้นผิว ตามเงื่อนไขการทดลอง	38
3.2 ศึกษาลักษณะการเกิดโซเดอริบรีดจ์ระหว่างสไลเดอร์และซีสเปนชั้น ที่วางทำมุมกัน 90°	40
3.2.1 วิธีการทดลอง	40
3.2.2 ผลการทดลอง	
3.2.2.1 ตัวอย่างผลการจำลองกรณีที่เกิดโซเดอริบรีดจ์.....	44
3.2.2.2 ผลการจำลองการเกิดโซเดอริบรีดจ์ด้วยโปรแกรม ภายใต้เงื่อนไขการทดลอง	44
3.2.2.3 เปรียบเทียบผลการทดลองทั้ง 3 กรณีในรูปแบบของกราฟ	49
3.2.2.4 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างการเกิดโซเดอริบรีดจ์ระหว่าง โมเดลและภาพถ่ายจากกล้องไมโครสโคป(cross_section img)....	52
บทที่ 4 การศึกษา และวัดพฤติกรรมเชิงพลวัตของของเหลวโดยใช้ระบบแฟลชโฟโตกราฟี.....	54
4.1 การออกแบบการทดลอง	54
4.2 วิธีการทดลอง	57
4.3 ผลการทดลอง.....	59
4.3.1 ผลการทดลองตัวอย่างภาพถ่ายหยดของเหลวที่เวลาใดๆ.....	59
4.3.2 ผลการทดลองวัดค่ามุมเปียก ความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลาง ของหยดของเหลว.....	59
บทที่ 5 การหาค่าพารามิเตอร์ของของเหลวจากระบบการถ่ายภาพของเหลว	63
5.1 แนวความคิดที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์สำหรับควบคุมอัตราการไหล	63
5.2 วิธีการทดลอง	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ผลการทดลอง(กรณีน้ำหวาน).....	66
5.3.1 ผลการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และแรงดันลม.....	66
5.3.2 ผลการบันทึกภาพอัตราการไหลของหยดน้ำหวานที่เวลาใดๆ (ระยะห่างภาพละ 25ms).....	67
5.3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เวลาใดๆ (on time).....	67
5.3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน ที่ระดับน้ำหวานค่าต่างๆ.....	68
5.4 ผลการทดลอง(กรณีน้ำมันมะกอก).....	74
5.4.1 ผลการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และแรงดันลม.....	74
5.4.2 ผลการบันทึกภาพอัตราการไหลของหยดน้ำหวานที่เวลาใดๆ (ระยะห่างภาพละ 35 ms).....	75
5.4.3 กราฟและสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา.....	76
5.4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน ที่ระดับน้ำมันมะกอกค่าต่างๆ.....	76
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	82
เอกสารอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก. Source code ของโปรแกรม.....	82
ภาคผนวก ข. รายละเอียดคุณสมบัติของอุปกรณ์ และวัสดุ.....	121
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	138
ประวัติผู้เขียน.....	149

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างลักษณะพฤติกรรมการไหลและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง	16
2.2 คุณสมบัติของตะกั่วหลอมเหลว	19
2.3 โครงสร้างของโมเดล	19
2.4 เงื่อนไขเบื้องต้นในการทดลองตอนที่ 1	24
2.5 เงื่อนไขเบื้องต้นในการทดลองตอนที่ 2	25
2.6 เปรียบเทียบอัตราการไหลของของเหลวแต่ละชนิด	33
2.7 ปริมาตรหยดของเหลวที่ได้จากสมการคำนวณ(V_I, V_{II}) และโปรแกรม CFD (V_N) ที่ระดับของเหลวค่าต่างๆ	33
3.1 ผลการทดลองการศึกษาลักษณะหยดของเหลวบนพื้นผิวตามเงื่อนไขการทดลอง	38
3.2 ผลการทดลองค่าปริมาตรตะกั่วที่ทำให้เกิดโซลเดอร์บริดจ์ที่มุมเปียกนั้นๆ ในกรณีที่ เปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนสไลเดอร์ และซัสเพนชันที่ surface tension = 0.45 N/m	44
3.3 ผลการทดลองค่าปริมาตรตะกั่วที่ทำให้เกิดโซลเดอร์บริดจ์ที่มุมเปียกนั้นๆ ในกรณีที่ เปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนสไลเดอร์ ที่ surface tension = 0.45 N/m	46
3.4 ผลการทดลองค่าปริมาตรตะกั่วที่ทำให้เกิดโซลเดอร์บริดจ์ที่มุมเปียกนั้นๆ ในกรณีที่ เปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนซัสเพนชันที่ surface tension = 0.45 N/m	48
5.1 ผลการทดลองค่าตัวแปร N และ $K_1 - K_3$ ที่ระดับน้ำหวานค่าต่างๆ	74
5.2 ผลการทดลองค่าตัวแปร K_0 ที่ระดับน้ำมันมะกอกค่าต่างๆ	81

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ส่วนประกอบของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์(read/write head)	1
1.2 ขั้นตอนการเชื่อมตะกั่วด้วยวิธียิงตะกั่ว(solder jetting)	2
1.3 โครงสร้างของสไลเดอร์และชัสเปนชั้น	2
1.4 โมเดลพื้นฐานสำหรับการศึกษาระบบหยุดของเหลว	3
1.5 ลักษณะการเกิดโซลเดอร์บริดจ์ระหว่างคู่ของสไลเดอร์และชัสเปนชั้นของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์	4
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความตึงผิว และแรงตึงผิว	7
2.2 ผิวหน้าของของเหลวที่มองเห็นเป็นเส้นโค้งเมื่อบรรจุอยู่ในภาชนะ	8
2.3 ลักษณะมุมสัมผัสของหยดของเหลวบนสภาพพื้นผิวที่ต่างกัน	9
2.4 การวัดมุมเปียกและแรงที่เกี่ยวข้อง	9
2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูง และความตึงผิวของเหลว	10
2.6 ปรากฏการณ์ที่เป็นผลมาจากแรงตึงผิว	10
2.7 การหาค่าความหนืดของของไหล	11
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress – rate of strain ของ non-Newtonian fluids	12
2.9 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทบิงแฮม	13
2.10 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทพลาสติก	13
2.11 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทไฮไซโทรอปิก	14
2.12 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทรีโอเพคซิก	14
2.13 ลักษณะของเส้นกราฟที่ได้จากการลงจุดบนกระดาษ log-log	15
2.14 แสดงส่วนประกอบการสร้างโมเดลในโปรแกรม surface evolver	17
2.15 โครงสร้างของโมเดลสำหรับการกำหนดแรงที่บริเวณเส้นสัมผัส	17
2.16 แสดงการกำหนดแรงลงในแกน e1-e3 สำหรับการคำนวณพลังงานในโปรแกรม	18
2.17 โมเดลโครงสร้างของอุปกรณ์ IC-QFP256 และ pad ที่จะเชื่อมด้วยตะกั่ว	18
2.18 การเชื่อมระหว่างฐานไอซีและขาของด้วยตะกั่วปริมาตรต่างๆ (a) $2.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3$, (b) $3.10 \times 10^{-11} \text{ m}^3$, (c) $3.18 \times 10^{-11} \text{ m}^3$ และ (d) $3.22 \times 10^{-11} \text{ m}^3$	20
2.19 ผลจากค่ามุมเปียกที่มีต่อการเกิดโซลเดอร์บริดจ์(V) = $3.10 \times 10^{-11} \text{ m}^3$, (a) 5° , (b) 22° , (c) 23° และ (d) 30°	20
2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเปียกและปริมาตรวิกฤตของตะกั่ว	21
2.21 ผลของแรงตึงผิวที่มีต่อการเกิดโซลเดอร์บริดจ์(V) = $3.18 \times 10^{-11} \text{ m}^3$ (a) $T=300 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, (b) $T=470 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, (c) $T=600 \times 10^{-3} \text{ N/m}$	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวและปริมาตรวิกฤตของตะกั่ว.....	22
2.23	เครื่องหยดตะกั่วหลอมเหลวที่ใช้ในการทดลอง	22
2.24	แสดงระบบการบันทึกภาพด้วยวิธีแฟลชโฟโตกราฟี.....	23
2.25	แสดงภาพการขยายตัว การสั้นตัว และการแข็งตัวของหยดโลหะบนเนื้อสาร โดยที่ อุณหภูมิบนเนื้อสาร $T_2 = 48^\circ\text{C}$, $v_0 = 1.54 \text{ m/s}$ และ $d_0 = 80 \mu\text{m}$	24
2.26	แสดงภาพการขยายตัว การสั้นตัว และการแข็งตัวของหยดโลหะบนเนื้อสาร โดยที่ อุณหภูมิบนแผ่นซับสเตรต $T_2 = 135^\circ\text{C}$, $v_0 = 1.49 \text{ m/s}$ และ $d_0 = 84 \mu\text{m}$	25
2.27	ตำแหน่งที่วัดบนพื้นผิวหยดของเหลว ตำแหน่ง AG แสดงระยะการขยายตัว ของหยดตะกั่ว และตำแหน่ง D แสดงความสูงหยดของเหลว.....	26
2.28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยการขยายตัวกับเวลา	26
2.29	สูงของหยดตะกั่ว(H) ที่อุณหภูมิบนพื้นผิวซับสเตรต(T_2) ค่าต่างๆ	27
2.30	วิธีการหาค่ามุมทางด้านซ้าย (IGA) และทางด้านขวา (HAG)	27
2.31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเปียก และการขยายตัวที่ความเร็ว(v_0) ค่าต่างๆ	28
2.32	โครงสร้าง pipe flow model	29
2.33	ค่าพารามิเตอร์ N และ K ใดๆ ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อระดับของเหลวเปลี่ยนไป.....	34
2.34	แผนผังแสดงการควบคุมระบบหยดของเหลว	35
2.35	ผลการจำลองขนาดหยดของเหลวกรณีควบคุมโดยใช้ fluid flow model เปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการควบคุม	35
2.36	การจัดการกับภาพ 2 มิติด้วยการทำ black & white	36
2.37	วิธีการหาค่าปริมาตรหยดของเหลวจากภาพ 2 มิติโดยการหมุนด้วยระยะที่สมมาตร รอบแกนสมมาตร	36
3.1	สร้างโมเดลเริ่มต้นเพื่อใช้ในโปรแกรม	37
3.2	โครงสร้างโมเดลเริ่มต้นสำหรับการใช้วิเคราะห์ลักษณะการเกิดโซลเดอร์บริดจ์	40
3.3	ภาพด้านข้างของรูปที่ 3.2 (โดยหมุนภาพทวนเข็มนาฬิกา 45°).....	40
3.4	ภาพการเกิดโซลเดอร์บริดจ์ที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโซลเดอร์บอล ทางด้านขวา(1) หลอมเหลวและแข็งตัวก่อนที่โซลเดอร์บอลซ้าย(2) จะหลอมเหลวแล้วเกิด โซลเดอร์บริดจ์ภายหลัง.....	41
3.5	ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดโซลเดอร์บริดจ์.....	42
3.6	ภาพการเกิดโซลเดอร์บริดจ์สำหรับการหาอัตราส่วน $L_1:L_2$	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 การเปรียบเทียบความแตกต่างของภาพตัดขวางบริเวณที่เกิดโซลเดอ์บริดจ์	43
3.8 การหาค่าอัตราส่วนเพื่อหากรณีที่เกิดโซลเดอ์บริดจ์.....	44
3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเปียกและปริมาตรวิกฤต surface tension = 0.45 N/m	50
3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเปียกและปริมาตรวิกฤต surface tension = 0.25 N/m.....	50
3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเปียกและปริมาตรวิกฤต surface tension = 0.65 N/m.....	51
3.12 กราฟแสดง %error ระหว่างภาพจากโปรแกรม(cross_program img) และภาพที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป(cross_scope img) จำนวน 5 ภาพ กรณีที่เปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนสไลด์เตอร์และซัสเพนชัน	52
3.13 กราฟแสดง %error ระหว่างภาพจากโปรแกรม(cross_program img) และภาพที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป(cross_scope img) จำนวน 5 ภาพ กรณีที่เปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนสไลด์เตอร์	52
3.14 กราฟแสดง %error ระหว่างภาพจากโปรแกรม(cross_program img) และภาพที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป(cross_scope img) จำนวน 5 ภาพ กรณีที่เปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนซัสเพนชัน.....	53
4.1 ระบบการถ่ายภาพหยดของเหลวด้วยเทคนิคแฟลชไฟโตกราฟี.....	54
4.2 ภาพถ่ายจากโปรแกรม Labview ที่เกิดจากการถ่ายภาพและแสงแฟลชทำงาน ยังไม่สอดคล้องกัน	55
4.3 หลักการทำงานของการ์ดถ่ายภาพ.....	55
4.4 การหน่วงเวลาเพื่อการถ่ายภาพและปล่อยแสงแฟลช	56
4.5 valve สำหรับยิงหยดของเหลว	56
4.6 การจัดอุปกรณ์การทดลองระบบถ่ายภาพเพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของหยดน้ำ	57
4.7 การวัดค่ามุมเปียกในโปรแกรม Matlab	57
4.8 วิธีการปรับเทียบอัตราส่วนระหว่างวัตถุจริง(a) และสเกลในภาพ(b)	59
4.9 ลักษณะเชิงพลวัตของหยดน้ำตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งหยุดนิ่งบนพื้นผิว.....	60
4.10 ค่ามุมเปียกทางด้านซ้าย และขวาของหยดน้ำ.....	61
4.11 ผลการทดลองความสูงของหยดน้ำที่เวลาต่างๆ	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ผลการวัดขนาดการขยายตัวของหยดน้ำ	62
5.1 การจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อศึกษาอัตราการไหลของเหลว	64
5.2 กระบอกบรรจุน้ำหวานสำหรับการทดลองวัดอัตราการไหล	64
5.3 วิธีการคำนวณค่าปริมาตร.....	65
5.4 สัญญาณสัญญาณที่ป้อนและที่วัดจาก pressure sensor(กรณีน้ำหวาน)	66
5.5 ภาพหยดน้ำหวานขณะใดตั้งแต่ในช่วงเวลา ON (0-500 ms)ของพัลส์ในรูป 5.4.....	67
5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาตรของหยดน้ำหวานที่เวลาใดๆ ที่ระดับของเหลว 12.5% of full scale	68
5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General power-law fluid ที่ระดับน้ำหวาน 12.5% of full scale.....	68
5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General power-law fluid ที่ระดับน้ำหวาน 25% of full scale.....	69
5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General power-law fluid ที่ระดับน้ำหวาน 50% of full scale.....	69
5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General power-law fluid ที่ระดับน้ำหวาน 75% of full scale.....	70
5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General power-law fluid ที่ระดับน้ำหวาน 100% of full scale.....	70
5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำหวาน 12.5% of full scale	71
5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำหวาน 25% of full scale	71
5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำหวาน 50% of full scale	72
5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำหวาน 75% of full scale	72
5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำหวาน 100% of full scale.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.17	สัญญาณที่ป้อนและที่วัดจาก pressure sensor(กรณีน้ำมันมะกอก)	74
5.18	ภาพหยดน้ำหวานขณะใดตั้งแต่ในช่วงเวลา ON (0-700 ms)ของพัลส์ในรูป 5.17.....	75
5.19	กราฟและสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา.....	76
5.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General Power-law fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 12.5% of full scale ...	76
5.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General Power-law fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 25% of full scale.....	77
5.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General Power-law fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 50% of full scale.....	77
5.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General Power-law fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 75% of full scale.....	78
5.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General Power-law fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 100% of full scale	78
5.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 12.5% of full scale.....	79
5.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 25% of full scale.....	79
5.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 50% of full scale.....	80
5.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 75% of full scale.....	80
5.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 100% of full scale.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญสัญลักษณ์

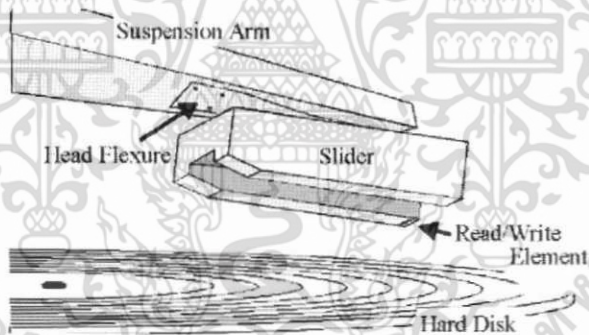
γ	ความตึงผิว(surface tension) หรืออาจหมายถึงพลังงานของพื้นผิว(surface energy) เมื่อใช้กับของแข็ง
F	แรงตึงผิว(surface force)
θ	มุมเปียก(wetting angle)
$\dot{\gamma}, \frac{du}{dx}, \frac{dv}{dr}$	อัตราเฉือน(shear rate)
τ	แรงเฉือน(shear stress)
μ	ความหนืด(viscosity)
τ_0, τ_y	yield stress
K	consistency index
n	power-law index
n	จำนวนเต็มบวก
V	ปริมาตร
v_0	ความเร็ว
u_z	ความเร็วการไหลในท่อของของเหลว
N	เลขยกกำลังใน General Power-law fluid Eq. มีค่าเท่ากับ $1/n$
K_0	สัมประสิทธิ์ของสมการ Newtonian fluid
$K_1 - K_3$	สัมประสิทธิ์ของสมการ General Power-law fluid
T	ค่าแรงตึงผิว(surface tension) ของตะกั่ว
T_i	แรงที่ให้กับพื้นที่สัมผัสกับตะกั่ว
A	พื้นที่ของบริเวณที่กำหนดให้เป็นตะกั่ว
A_i	พื้นที่ที่ตะกั่วสัมผัสกับ pad หรือ lead
ρ	ความหนาแน่นของตะกั่ว(density)
g	แรงโน้มถ่วง(gravity)
V	ปริมาตรตะกั่วที่หลอมเหลว
λ	Lagrange multiplier

บทที่ 1

บทนำ

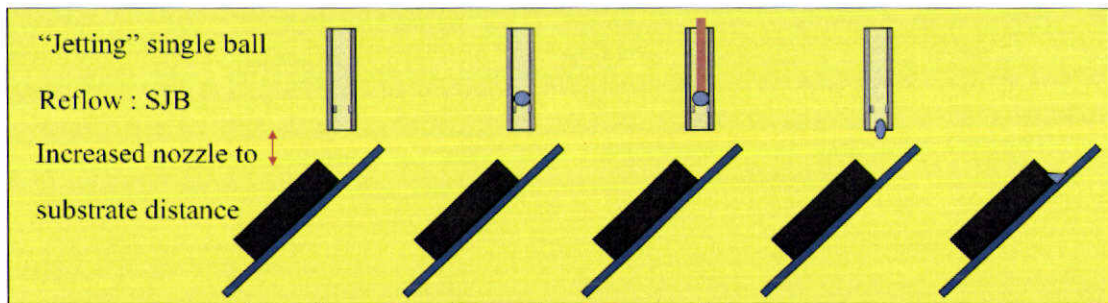
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมบางประเภทอาจจะต้องทำการประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นงานที่เกี่ยวข้องกับระบบหยดของเหลว(fluid dispensing system) และมี ค่าๆ หนึ่งที่ใช้อยู่เสมอจนกลายเป็นคำศัพท์ที่สำคัญในงานประเภทนี้ไปแล้ว นั่นคือ “droplet on demand” ถ้าแปลตามความหมายตรงตัวจะแปลได้ว่า “หยดของเหลวตามที่ต้องการ” หมายถึง คุณลักษณะ และ/หรือปริมาตรหยดของเหลวจะต้องเป็นไปตามที่อุตสาหกรรมการผลิตประเภทนั้นๆ กำหนด เช่น การพัฒนาหัวหยดน้ำหมึกเพื่อให้สามารถหยดน้ำหมึกที่มีค่าความหนืดสูงๆ ได้ การพัฒนาและปรับปรุงระบบการเชื่อมตาระหว่างสไลเดอร์และซัสเพนชันของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์โดยใช้วิธี โซเดอ์เจ็ต และการควบคุมระบบหยดของเหลวเพื่อให้ได้ขนาดคงที่ตามที่ต้องการ ตลอดจน ของเหลวและพื้นผิว(substrate) ที่ใช้จะต้องมีความเหมาะสมและสามารถควบคุม กำหนดลักษณะ หยดเมื่ออยู่บนพื้นผิวได้ เป็นต้น



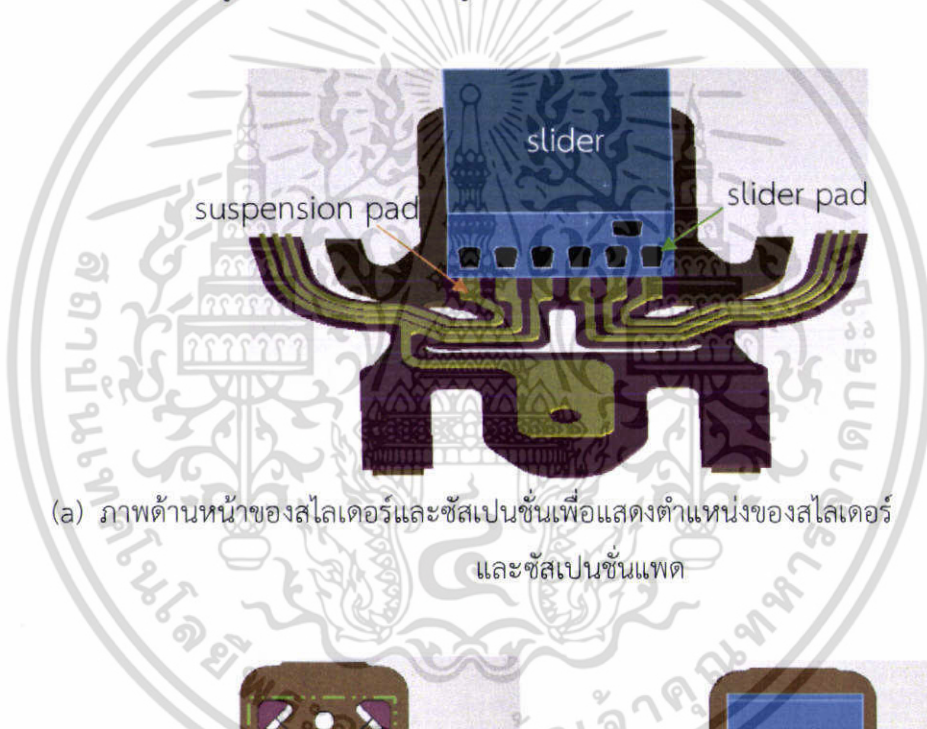
รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์(read/write head)

ขั้นตอนหนึ่งของอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ที่จะต้องเชื่อมสัญญาณจากหัวอ่าน (read/write head) เข้ามาที่ตัวซัสเพนชัน(suspension arm) ดังรูป 1.1 โดยทำการเชื่อมติดกันทาง ไฟฟ้าระหว่างสไลเดอร์และซัสเพนชันแพดด้วยตะกั่วบัดกรี โดยใช้วิธีโซเดอ์เจ็ต (SJB: Solder Jet Bonding) ดังรูป 1.2(ในขั้นตอนการเชื่อมด้วยตะกั่ว สไลเดอร์(กล่องสี่เหลี่ยมด้านซ้าย) วางทำมุม 90° กับซัสเพนชัน(แท่งสี่เหลี่ยมด้านขวา) เมื่อตะกั่วถูกไหลตมาอยู่ในตำแหน่งที่พร้อมจะยิงแสงเลเซอร์ แล้ว หลังจากยิงแสงเลเซอร์ลงมาทำให้ตะกั่วหลอมเหลวและหยดลงมาเชื่อมระหว่างแพดของสไล เดอร์ และซัสเพนชัน(โครงสร้างด้านหน้าเพื่อให้เห็นสไลเดอร์และซัสเพนชันแพด แสดงดังรูปที่ 1.3(a))

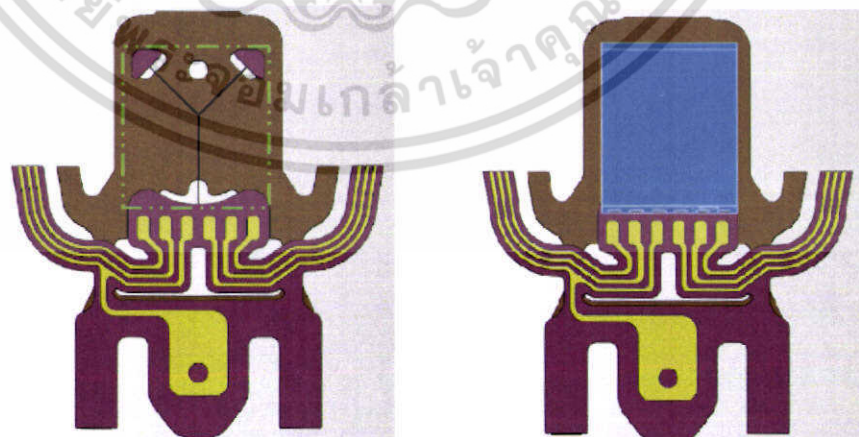


รูปที่ 1.2 ขั้นตอนการเชื่อมตะกั่วด้วยวิธียิงตะกั่ว(solder jetting)

แต่ก่อนที่จะเชื่อมสัญญาณดังกล่าวนั้นจะต้องยึดสไลเดอร์ติดกับซัสเพนชันด้วยหยดกาวก่อนโดยใช้วิธีการหยดกาว(pressure dispenser) โดยโครงสร้างของซัสเพนชันและบริเวณที่จะหยดกาวนั้นแสดงด้วยพื้นที่สีม่วงที่อยู่ในกรอบเส้นประ ดังรูปที่ 1.3(b) ซ้าย



(a) ภาพด้านหน้าของสไลเดอร์และซัสเพนชันเพื่อแสดงตำแหน่งของสไลเดอร์และซัสเพนชันแพด

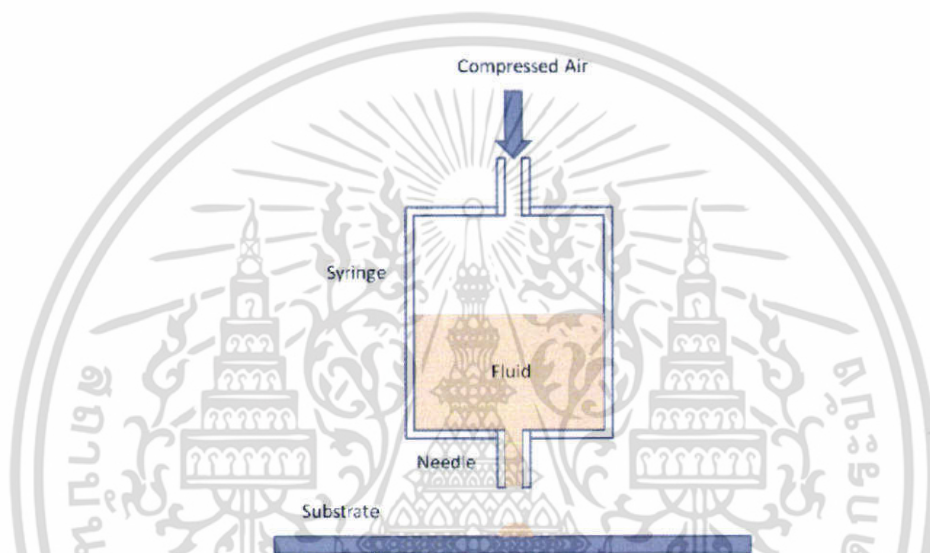


(b) โครงสร้างของซัสเพนชันในตำแหน่งที่จะหยดกาวอยู่บนพื้นที่สีม่วงในกรอบเส้นประ (รูปซ้าย) และ โครงสร้างสไลเดอร์หลังจากยึดติดบนซัสเพนชัน (รูปขวา)

รูปที่ 1.3 โครงสร้างของสไลเดอร์และซัสเพนชัน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

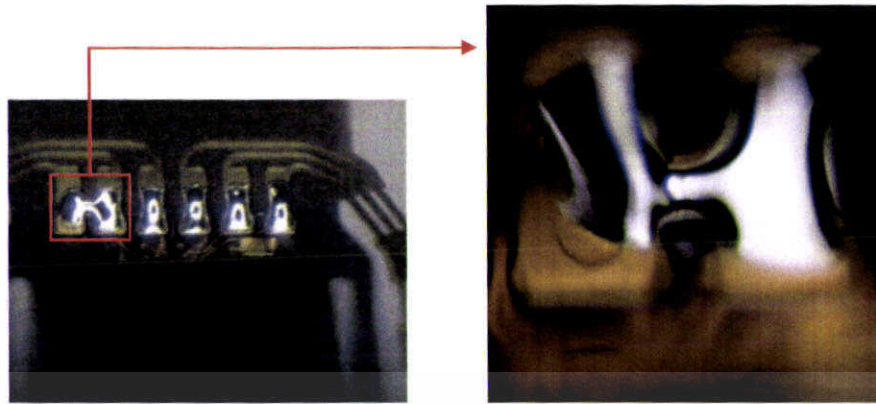
แต่เนื่องจากปริมาณการไหลที่ปล่อยอยู่ในกระบอกหยดลดลงเรื่อยๆ จึงทำให้ปริมาณหยดการไม่คงที่ ซึ่งถ้าปริมาณการน้อยเกินไปอาจทำให้สไลเตอร์หลุดออกจากซัสเพนชันได้ แต่ถ้าปริมาณการมากเกินไปอาจทำให้สิ้นเปลืองทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการอบการให้แห้ง และสำหรับในกรณีที่ย่ำแย่ไปกว่านี้คือ ชิ้นส่วนอุปกรณ์บริเวณที่อยู่ใกล้เคียงอาจเกิดความเสียหายจากช่วงระยะเวลาการอบการที่นานเกินไปได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการควบคุมขนาดหยดของเหลวให้มีความแม่นยำจากการถ่ายภาพหยดของเหลวด้วยเทคนิคแฟลชโฟโตกราฟี โดยมีโมเดลพื้นฐานที่ใช้ศึกษาอัตราการไหลของของเหลวแสดงดังรูป 1.4 นอกจากนี้ยังเป็นการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของหยดของเหลวจากการจัดอุปกรณ์ดังกล่าวด้วย



รูปที่ 1.4 โมเดลพื้นฐานสำหรับการศึกษาระบบหยดของเหลว

ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมตะกั่วด้วยวิธีโซลเตอร์เจ็ตดังกล่าวมีหลายประการ แต่สิ่งที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต คือ การเกิดโซลเตอร์บริดจ์ระหว่างแพดข้างเคียงที่อยู่ติดกัน ดังตัวอย่างในรูป 1.5 โดยมีสาเหตุสำคัญได้แก่ ค่าของมุมเปียกไม่เหมาะสม และพฤติกรรมเชิงพลวัตของตะกั่วในสภาวะที่หลอมเหลว จากการศึกษาในทางทฤษฎีเชิงลึกพบว่าตัวแปรดังกล่าวเป็นผลมาจากกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ที่ซับซ้อน ซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือสูตรคำนวณเพื่อทำการคาดการณ์ค่ามุมเปียกและพฤติกรรมเชิงพลวัตได้อย่างแม่นยำ และakorกับขนาดของสไลเตอร์และซัสเพนชันของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ ทำให้มีความต้องการที่จะมีระบบการวัดมุมเปียกและพฤติกรรมเชิงพลวัตของตะกั่วหลอมเหลวมีมากยิ่งขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการใช้โปรแกรม surface evolver เพื่อศึกษาปัญหาการเกิดโซลเตอร์บริดจ์ ด้วยการพิจารณาค่าของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการเกิดโซลเตอร์บริดจ์ดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.5 ลักษณะการเกิดโซเดอริบรีดจ์ระหว่างคู่ของสไลเดอร์และซัสเพนชันของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ [1]

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อวิจัยและพัฒนาระบบการวัดพฤติกรรมเชิงพลวัตและมุมเปียกของหยดของเหลว
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความถูกต้องและแม่นยำของค่าที่วัดได้จากระบบการวัดพฤติกรรมเชิงพลวัตและมุมเปียกเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี
3. สามารถนำเสนอแนวทางการพัฒนาระบบการหยดของเหลวให้มีความแม่นยำได้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ปัญหาสำคัญในการควบคุมระบบหยดของเหลว คือ ปริมาตรหยดของเหลวเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ สาเหตุเกิดจากระดับของเหลวในกระบอกหยดเปลี่ยนแปลง ประกอบกับอัตราการไหลของเหลวขึ้นอยู่กับเวลาที่จ่ายแรงดันให้ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของเหลวที่เหลืออยู่ในกระบอกขณะนั้น จึงเป็นปัญหาที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ดังนั้นการศึกษความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเหลวที่เหลืออยู่ในกระบอกหยดแต่ละช่วงเวลากับระยะเวลาที่จ่ายแรงดันเพื่อควบคุมให้ปริมาตรหยดของเหลวมีความคงที่โดยจัดอุปกรณ์การทดลองระบบหยดของเหลว ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคแฟลชโฟโตกราฟีจะทำให้สามารถหาอัตราการไหลของหยดของเหลว ณ เวลาใดๆ ได้เพื่อนำไปสู่การหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการควบคุมระบบหยดของเหลวให้มีความแม่นยำต่อไป อีกทั้งยังเป็นการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของเหลวจากการจัดอุปกรณ์ดังกล่าวด้วย และหลังจากที่หยดของเหลวตกกระทบพื้นและมีลักษณะหยุดนิ่งอยู่บนพื้นผิวเป็นอย่างไรนั้น สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองภาพหยดของเหลวที่ได้กับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม surface evolver ซึ่งเป็นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงลักษณะหยดของเหลวบนพื้นผิวแบบเสถียรตามเงื่อนไขที่กำหนดให้ เช่น แรงตึงผิว แรงโน้มถ่วง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับปัญหาการเกิดโซลเดอ์บริดจ์ที่มีสาเหตุเกิดจากค่าของมุมเปียกไม่เหมาะสมนั้น สามารถศึกษาโดยใช้โปรแกรม surface evolver จำลองลักษณะการเกิดโซลเดอ์บริดจ์ที่เงื่อนไขมุมเปียกค่าต่างๆ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การใช้โปรแกรม surface evolver เพื่อวิเคราะห์ลักษณะหยดของเหลวบนพื้นผิว และตัวแปรที่เกี่ยวข้องเป็นแนวความคิดหนึ่งที่สามารถทำได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายใดๆ เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถหาดาวนโหลดเองได้ สะดวกและรวดเร็วต่อการใช้งาน โปรแกรม surface evolver ใช้สำหรับศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวเมื่อกำหนดเงื่อนไขให้ โดยที่เงื่อนไขเกี่ยวข้องกับแรงในรูปแบบต่างๆ เช่น surface tension, gravitational energy, square mean curvature, user-defined surface integrals, knot energy เป็นต้น โปรแกรมจะนำค่าแรงต่างๆ นี้มาคำนวณร่วมกับรูปทรงที่สร้างขึ้นเพื่อให้พลังงานของพื้นผิวมีค่าต่ำสุด สุดท้ายโปรแกรมจะจำลองลักษณะพื้นผิวไปตามค่าพลังงานต่ำสุดด้วยวิธีที่เรียกว่า gradient decent method

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการทดลองที่ได้จากการใช้โปรแกรมจึงได้จัดอุปกรณ์การทดลองจริงเพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัต โดยใช้วิธีการบันทึกลักษณะเชิงพลวัตดังกล่าวด้วยการถ่ายภาพ ณ เวลาใดๆ วิธีการบันทึกภาพด้วยความเร็วสูงมีได้หลากหลายวิธี เช่น การใช้กล้องความเร็วสูง แฟลชไฟโตกราฟี และแฟลชวิดีโอกราฟี เป็นต้น ความต่างระหว่างการใช้กล้องความเร็วสูงและแฟลชไฟโตกราฟี คือ กล้องความเร็วสูงจะทำการจับภาพทุกเฟรมที่ความเร็วสูงสุดของเหตุการณ์เดียว ในขณะที่การใช้แฟลชจะเป็นการสร้างภาพต่อเนื่องจากการถ่ายภาพจากเหตุการณ์หลายๆ ครั้งที่เกิดขึ้นอย่างซ้ำๆ กัน ในกรณีการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตและมุมเปียกของหยดของเหลวนี้ เหตุการณ์จะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ประมาณระดับมิลลิวินาทีหรืออาจเป็นไมโครวินาที ซึ่งหากใช้กล้องความเร็วสูงจะต้องใช้อัตราเฟรมที่สูงมาก และมีราคาสูงตามไปด้วยเช่นกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงจะได้ใช้วิธีแฟลชไฟโตกราฟี ผนวกกับการประมวลผลภาพ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการแนวทางการศึกษา และวิธีการวัดพฤติกรรมเชิงพลวัตของหยดของเหลว โดยการแบ่งงานออกเป็น 2 ส่วนตามลักษณะพฤติกรรมของหยดของเหลว แบบแรกคือ การศึกษาลักษณะของเหลวในขณะหยดหนึ่งอยู่บนพื้นผิว และการศึกษาเชิงพลวัตตั้งแต่เริ่มหยดของเหลวจนกระทั่งหยดหนึ่งบนพื้นผิว โปรแกรม surface evolver ใช้สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของเหลวขณะหยดหนึ่งบนพื้นผิว ซึ่งเป็นผลที่ได้จากค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ปริมาตรหยดของเหลว มุมเปียก สภาพพื้นผิว เป็นต้น อีกทั้งยังได้นำเสนอตัวอย่างการนำเอาโปรแกรม surface evolver ไปประยุกต์ใช้งานจริงสำหรับการพิจารณาปัญหาการเกิดโซลเดอ์-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริดจ์ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์โดยการศึกษาจากตัวแปรและค่าของตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดโซเดอริบรีดจ์ และแบบที่สองคือ วิธีการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของหยดของเหลวที่เวลาใดๆ โดยได้จัดอุปกรณ์ระบบหยดของเหลวร่วมกับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคแฟลชโฟโตกราฟี นอกจากนี้ยังได้นำระบบแฟลชโฟโตกราฟีไปใช้สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระบบหยดของเหลวให้คงที่

1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 6 บท ซึ่งประกอบด้วย

- บทที่ 1 ความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งมั่นและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย และขอบเขตของการวิจัย
- บทที่ 2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแรงตึงผิว คุณสมบัติของไหล การทำงานของระบบถ่ายภาพ รวมไปถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และขั้นตอนการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- บทที่ 3 การจำลองลักษณะหยดของเหลวบนพื้นผิว และตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในงานฮาร์ดดิสก์ด้วยโปรแกรม surface evolver
- บทที่ 4 การศึกษาและวัดพฤติกรรมเชิงพลวัตของของเหลวโดยใช้ระบบแฟลชโฟโตกราฟี
- บทที่ 5 การหาค่าพารามิเตอร์ของของเหลวจากระบบการถ่ายภาพของเหลว
- บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ
บรรณานุกรม
ภาคผนวก

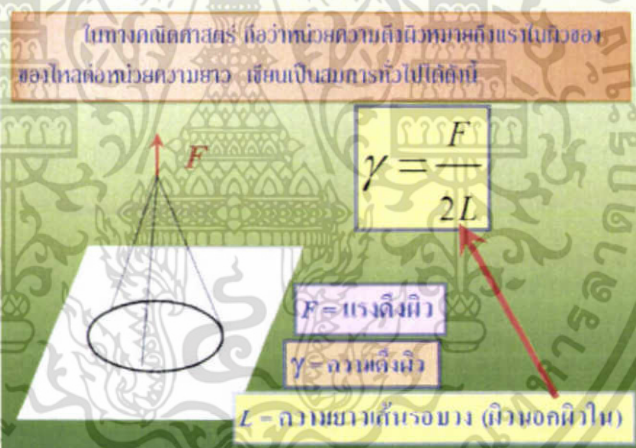
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณสมบัติของของเหลว และการไหล

2.1.1 ความตึงผิว(surface tension) พื้นผิวของเหลวจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของเหลวชนิดเดียวกัน(cohesion) ที่พยายามยึดผิวของเหลวให้ตึง เรียกว่า แรงตึงผิว (surface force) เมื่อของเหลวสัมผัสกับภาชนะและสัมผัสกับอากาศจะมีแรงเกาะติด(adhesion) ที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับโมเลกุลของภาชนะและโมเลกุลของอากาศ แรงตึงผิวของของเหลวจะมีทิศขนานกับผิวของเหลวและตั้งฉากกับเส้นขอบที่ของเหลวสัมผัส

อัตราส่วนระหว่างแรงตึงผิวกับความยาวเส้นขอบของรอยฉีกที่ผิวซึ่งสัมผัสกับอากาศ เรียกว่า ความตึงผิว(surface tension) อธิบายดังรูป 2.1 ปรากฏการณ์บางอย่างเกิดจากความตึงผิวของของเหลว เช่น การโค้งงอของผิวของเหลว การซึมตามรูเล็ก ฟองอากาศและหยดน้ำ เป็นต้น[2]



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความตึงผิว และแรงตึงผิว [2]

ความตึงผิวมีหน่วยเป็นแรงต่อความยาว หรือพลังงานต่อพื้นที่ เช่น dyn/cm, N/m แต่เมื่ออ้างถึงพลังงานต่อพื้นที่จะหมายถึง surface energy ที่เป็นความหมายในทอมทั่วไปที่ใช้กับพื้นผิวของแข็งไม่เฉพาะกับของเหลว

***หมายเหตุ หน่วยของความตึงผิวคือหน่วยของแรงต่อหน่วยของความยาว ซึ่งในระบบ SI คือ N/m แต่ในระบบ cgs ความตึงผิวมีหน่วยเป็น ดายน์ (dyne) ต่อเซนติเมตร (dyn/cm) โดยที่ 10^5 dyn = 1 N และดังนั้น ความตึงผิว 1 dyn/cm = 10^{-3} N/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-การโค้งของผิวของเหลว

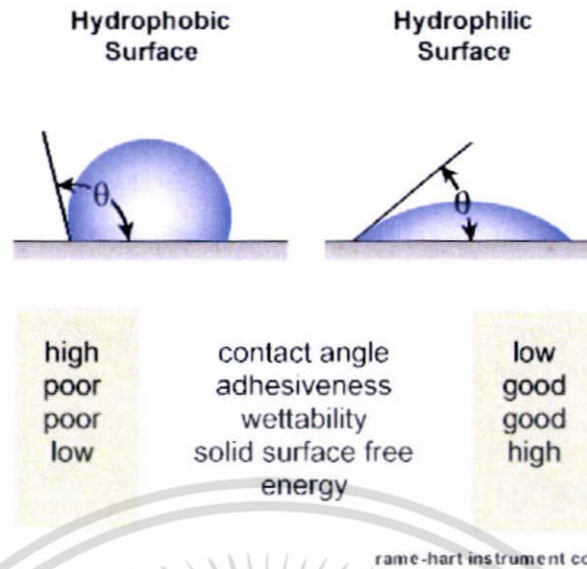
เมื่อเทของเหลวลงในภาชนะและของเหลวนั้นอยู่นิ่ง สังเกตที่ผิวของเหลวจะพบว่า ผิวของเหลวตรงบริเวณที่สัมผัสผิวภาชนะมีลักษณะโค้ง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การโค้งของผิวของเหลว (meniscus effect) ดังรูป 2.2 ซึ่งเกิดจากแรงระหว่างโมเลกุล (intermolecular force) แต่แต่ละโมเลกุลจะมีแรงดึงดูดทางเคมีไฟฟ้าซึ่งมีขนาดไม่มากนักยึดเหนี่ยวโมเลกุลเอาไว้ เรียกแรงนี้ว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) มี 2 ชนิด คือ แรงระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน (cohesive force) และแรงระหว่างโมเลกุลต่างชนิดกัน (adhesive force)

จากปรากฏการณ์การโค้งของผิวของเหลว จะเห็นได้ว่า ผิวของเหลวกับผิวของแข็งจะทำมุมกัน สำหรับของเหลวและของแข็งคู่หนึ่งๆ มุมระหว่างผิวทั้งสองมีค่าต่างกัน มุมระหว่างผิวของเหลวกับผิวของแข็ง ณ จุดสัมผัส เรียกว่า มุมสัมผัส เรียกว่า มุมสัมผัส (contact angle: θ) มีค่าตั้งแต่ 0° - 180°



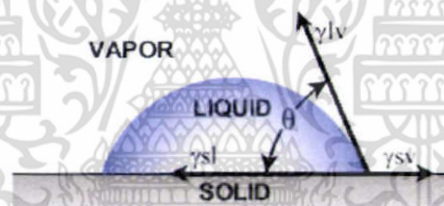
รูปที่ 2.2 ผิวหน้าของของเหลวที่มองเห็นเป็นเส้นโค้งเมื่อบรรจุอยู่ในภาชนะ [2]

มุมสัมผัสจะบอกให้ทราบว่า เมื่อของเหลวอยู่บนพื้นผิว ผิวของเหลวนั้นจะอยู่ในสภาพเป็นหยด (ไม่ทำให้พื้นผิวเปียก) หรือแผ่กระจาย (ทำให้พื้นผิวเปียก) โดยพิจารณาดังนี้ ถ้ามุมสัมผัสมีค่ามากกว่า 90° พื้นผิวลักษณะนี้เรียกว่า hydrophobic surface ซึ่งจะมีลักษณะที่ไม่ทำให้พื้นผิวเปียก มีค่า adhesive และ surface energy ต่ำ ตรงกันข้ามกับกรณีที่มีมุมสัมผัสมีค่าน้อยซึ่งพื้นผิวลักษณะนี้เรียกว่า hydrophilic รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะมุมสัมผัสของหยดของเหลวบนสภาพพื้นผิวที่ต่างกัน [3]
ความสัมพันธ์ระหว่าง cohesive และ adhesive force เป็นไปตามสมการของยังส์ [3] คือ

$$\gamma^{sv} = \gamma^{sl} + \gamma^{lv} \cos\theta \quad (2.1)$$

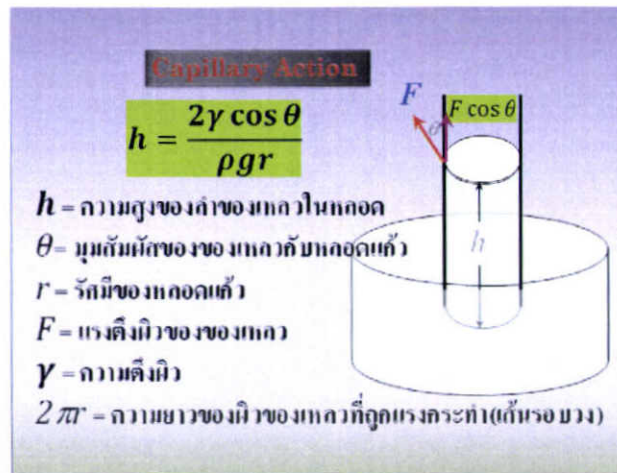


รูปที่ 2.4 การวัดมุมเปียกและแรงที่เกี่ยวข้อง [3]

- เมื่อ θ คือ มุมสัมผัส
 γ^{sl} คือ พลังงานพื้นผิวที่บริเวณสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว
 γ^{sv} คือ พลังงานอิสระที่ผิวของแข็ง (solid surface free energy)
 γ^{lv} คือ พลังงานอิสระที่ผิวของเหลว (liquid surface free energy)

ตัวอย่างการนำเรื่องมุมสัมผัสไปใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น การออกแบบสินค้า เช่น ร่ม เต็นท์ เสื้อผ้าที่กันน้ำได้ ผู้ผลิตได้ใช้ผ้าที่เคลือบด้วยสารบางอย่างที่มีคุณสมบัติทำให้ค่ามุมสัมผัสมากกว่า 90° เมื่อผ้าถูกน้ำ น้ำจะอยู่ในสภาพเป็นหยดน้ำบนผ้าแทนที่จะแตกกระจายและซึมผ่านเนื้อผ้าเข้าไป -การซึมตามรูเล็ก (Capillary action)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูง และความตึงผิวของเหลว [2]

จากปรากฏการณ์ซึมตามรูเล็ก เมื่อจุ่มหลอดรูเล็กลงในน้ำ น้ำจะเข้าไปในหลอดและมีระดับสูงกว่าระดับนํ้านอกหลอด ความสูงของน้ำนี้จะมีค่าคงตัวไม่ว่าปลายหลอดรูเล็กที่จุ่มอยู่ในน้ำจะอยู่ลึกเท่าใด แต่สำหรับกรณีหลอดรูเล็กจุ่มอยู่ในปรอท ระดับปรอทในหลอดจะอยู่ต่ำกว่าระดับปรอทภายนอกหลอด เป็นเพราะแรงระหว่างโมเลกุลเดียวกัน (cohesive) ของปรอทมีค่ามากกว่าแรงระหว่างโมเลกุลของปรอทกับโมเลกุลของแก้วของหลอดรูเล็ก (adhesive) ระดับปรอทภายในและภายนอกหลอดที่ต่างกันนี้มีค่าคงตัว ไม่ว่าปลายหลอดรูเล็กที่จุ่มอยู่ในปรอทจะอยู่ลึกเท่าใด นอกจากนี้ในธรรมชาติยังมีปรากฏการณ์อีกมากมายที่เป็นผลมาจากแรงตึงผิว ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.6 ปรากฏการณ์ที่เป็นผลมาจากแรงตึงผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

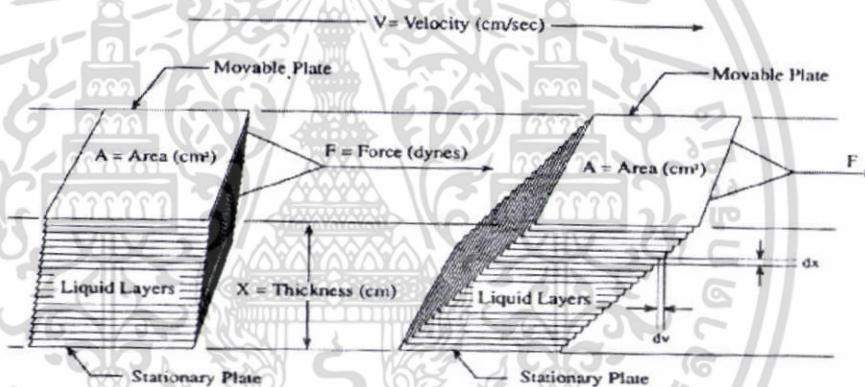
2.1.2 ความหนืด(viscosity)

ความหนืดเป็นสมบัติของไหลที่ต้านการเคลื่อนที่ของของไหล จากรูป 2.7 ของไหลประกอบด้วยชั้นต่างๆ ซ้อนกันอยู่ ออกแรง F กระทำกับแผ่นของไหล ชั้นของไหลมีความสูงเท่ากับ X ซึ่งความเร็วแต่ละชั้นไม่เท่ากันโดยชั้นบนมีความเร็วสูงสุดในขณะที่ชั้นล่างมีความเร็วต่ำสุด

ความแตกต่างระหว่างความเร็ว (dv) ของของไหลสองแผ่นกับระยะทางที่เปลี่ยนไป (dx) คืออัตราเฉือน(shear rate: $\dot{\gamma}$) ที่อยู่ในเทอมของ velocity gradient(dv / dx) ค่าแรงต่อหน่วยพื้นที่ทำให้เกิดการไหล เรียกว่า แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่(shear stress: τ) ถ้าของไหลมีความหนืดสูงชั้นก็จะต้องใช้แรงเฉือนที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้อัตราเฉือนเท่าเดิม ดังนั้นอัตราเฉือนจึงเป็นอัตราส่วนกับแรงเฉือนดังแสดงในสมการ

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dx} \tag{2.2}$$

เมื่อ μ คือ ความหนืด มีหน่วย dynes.sec.cm⁻² หรือ poise



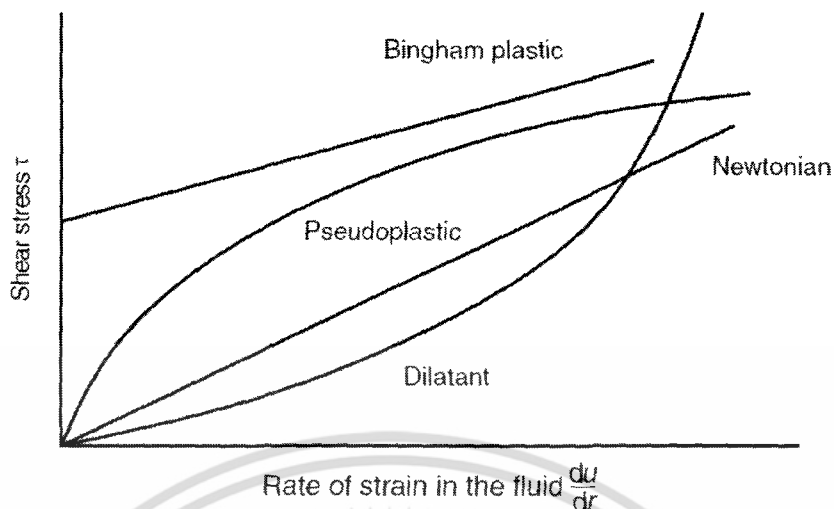
รูปที่ 2.7 การหาค่าความหนืดของของไหล [4]

ลักษณะการไหลของของไหลสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. Newtonian fluid: เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิค่าใดค่าหนึ่งของไหลจะมีความหนืดคงที่ ตัวอย่างเช่น น้ำ น้ำมันเจือจาง เป็นต้น
2. Non Newtonian fluid: การไหลของของไหลไม่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน กล่าวคือ ความหนืดไม่คงที่ สามารถเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นกับอัตราเฉือน(shear rate) non-Newtonian fluid มีลักษณะพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีหลายรูปแบบดังรูป 2.8 นอกจากนี้ non-Newtonian fluid ยังสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

2.1 พวกที่ไม่ขึ้นกับเวลา(Time independent non-Newtonian fluid) ค่าความหนืดของของไหลพวกนี้จะขึ้นอยู่กับ shear stress และ shear rate แต่จะไม่ขึ้นกับเวลาที่ของไหลได้รับความเค้นเฉือน(shear stress) ตัวอย่างของไหลประเภทนี้ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง stress – rate of strain ของ non-Newtonian fluids [5]

2.1.1 Pseudoplastic fluids

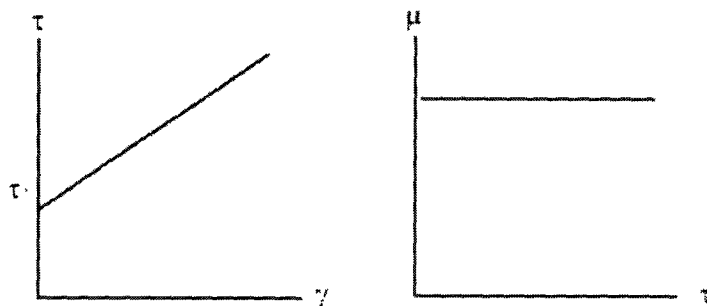
ลักษณะของการไหลประเภทนี้คือ ค่าความหนืดมีค่าลดลงเมื่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ลักษณะการไหลประเภทนี้ยังมีชื่อเรียกอื่นๆว่า Shear-thinning และ Power law liquid ตัวอย่างทั่วไปของของไหลประเภทนี้ได้แก่ นม, fruit puree, มายองเนส, มัสตาด และ ซุปผัก เป็นต้น

2.1.2 Dilatant fluids

ลักษณะของการไหลประเภทนี้คือ ค่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะของการไหลประเภทนี้พบเห็นได้ยากกว่าประเภท pseudoplastic ของไหลประเภทนี้จะพบเห็นได้ในของไหลหรืออาหารลักษณะที่มีตะกอนของแข็งนอนกัน ยกตัวอย่างเช่น candy compound , น้ำแป้งข้าวโพด นอกจากนี้ลักษณะของไหลนี้ยังเรียกอีกอย่างได้ว่าลักษณะการไหลแบบ Shear-thickening

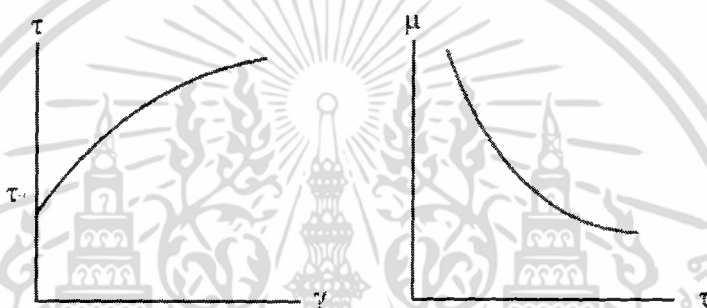
2.1.3 Plastic fluids และ Bingham fluid

ของไหลประเภทนี้ที่ค่าแรงเฉือนมีค่าต่ำๆจะไม่มี การเคลื่อนที่แต่อย่างใด จนกระทั่งค่าแรงเฉือนเพิ่มขึ้นถึงค่า τ_0 ซึ่งเรียกจุดที่แรงเฉือนมีผลทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่นี้ว่า Yield value หรือ ในบางตำราเรียกว่า Yield stress ในของไหลบิงแฮม(Bingham fluids) เมื่อออกแรงเฉือนจนถึงจุด Yield stress หลังจากนั้นของไหลจะพฤติกรรมเหมือนของไหลนิวโตเนียน ดังรูปที่ 2.9 ตัวอย่างของของไหลที่มีพฤติกรรมแบบนี้ได้แก่ ซอสมะเขือเทศ (Tomato catsup) ส่วนของไหลพลาสติกนั้นเมื่อออกแรงจนถึงจุด Yield stress ของไหลก็จะมีพฤติกรรมการไหลคล้ายกับของไหล Pseudoplastic ดังแสดงในรูปที่ 2.10



Non-newtonian fluids
Bingham type

รูปที่ 2.9 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมกรไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทบิงแฮม [6]



Non-newtonian fluids
Plastic type

รูปที่ 2.10 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมกรไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทพลาสติก [6]

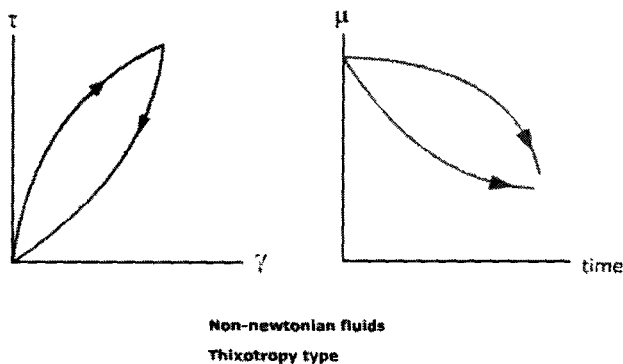
2.2 พวกที่ขึ้นกับเวลา(Time dependent non-newtonian fluids) ค่าความหนืดของของไหลพวกนี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับค่า Shear stress และ Shear rate แล้ว ยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ของไหลได้รับแรงเค้นเฉือนได้รับ ตัวอย่างของไหลประเภทนี้ได้แก่

2.2.1 Thixotropic fluids

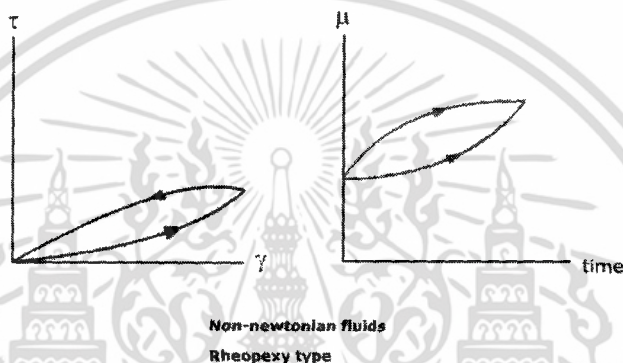
ของไหลประเภทนี้ค่าความหนืดจะลดลงตามระยะเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อของไหลได้รับแรงเค้นเฉือนในอัตราคงที่ ลักษณะการไหลประเภทนี้พบได้น้อย แต่ก็มีพบบ้างในวัสดุประเภท grease , สีทาบ้าน และน้ำหมึกสำหรับเครื่องพิมพ์ขนาดใหญ่

2.2.2 Rheopectic fluids

ของไหลประเภทนี้ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.12 เมื่อของไหลได้รับแรงเค้นเฉือนในอัตราคงที่ ลักษณะการไหลแบบรีโอเพคซิกนี้ค่อนข้างจะพบได้ยาก



รูปที่ 2.11 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทไธโซทรอปิก [6]



รูปที่ 2.12 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทริโอเพคซิก [6]

ในการที่จะตัดสินว่าอาหารแสดงคุณสมบัติแบบใด และมีค่าความข้นหนืดเท่าใด นั้นขึ้นอยู่กับ การวัด ค่า Apparent viscosity (μ) และ Shear rate ($\dot{\gamma}$) ซึ่งมีหน่วยเป็น Pa.s (1,000 centipoises) และ second^{-1} ตามลำดับ เครื่องมือสำหรับวัดเรียกโดยทั่วไปว่า Rheometer หรือ Viscometer ซึ่งมีหลายแบบ แต่โดยทั่วไปสามารถ แสดงค่า μ และ $\dot{\gamma}$ ได้ ที่นิยมคือ Brookfield® viscometer.

สำหรับ Rotational viscometer (ตัวอย่าง Brookfield viscometer) การเปลี่ยนความเร็วของการหมุน (rotational speed ของ spindle) เพิ่มขึ้น หมายถึงการเพิ่ม Shear rate ($\dot{\gamma}$) ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ Apparent viscosity (μ) ถ้าการเปลี่ยนแปลงของ rotational speed ไม่ทำให้ μ เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ถือว่าอาหารนั้นมีคุณสมบัติเป็น Newtonian fluid และสามารถสรุปได้ว่าอาหารมีความข้นหนืดเท่ากับ μ แต่ถ้าการเปลี่ยนแปลงของ rotational speed ทำให้ μ เปลี่ยนแปลง ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในรูปเอกซ์โปเนนเชียล ถือว่าอาหารนั้นมีคุณสมบัติเป็น Non-newtonian fluid การสรุปความข้นหนืดของอาหารใน รูป μ ต้องกำกับ g ด้วยเสมอ อย่งไรก็ตาม เพื่อความเป็นสากล การรายงานความหนืดของอาหาร non-newtonian นิยมรายงานในค่าทั่วไปของ ความหนืดซึ่งได้แก่ consistency index, K ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) และ Flow behavior, n (ไม่มีหน่วย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า K และ n คำนวณจากความสัมพันธ์ ของ Herschel-Bulkley model ในรูปของ ค่า Apparent viscosity (μ) และ Shear rate ($\dot{\gamma}$) ดังนี้

$$\mu = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.3)$$

$$\log \mu = \log K + (n-1) \log \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

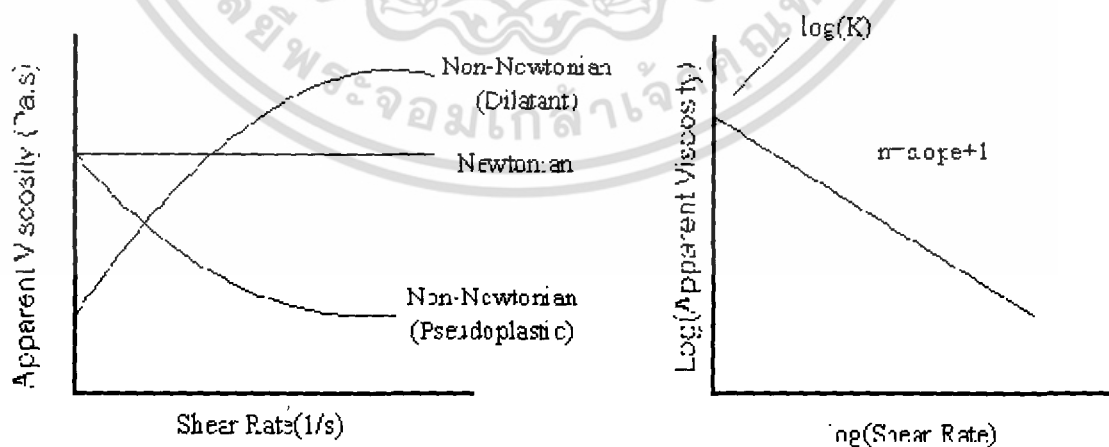
เมื่อ μ = apparent viscosity
 K = consistency index (Pa.sⁿ)
 n = flow behavior (power-law index)

โดยการพลอตกราฟ log-log ระหว่าง Log (μ) บนแกน Y และ Log($\dot{\gamma}$) บนแกน X ค่า slope คือ $(n-1)$ และ interception คือ Log(K) ตามตัวอย่างในรูปที่ 2.13 [6]

$$n = \text{slope} + 1$$

$$K = 10^{\text{intercept}} \text{ Pa.s}^n$$

จะสังเกตได้ว่าถ้าอาหารมีคุณสมบัติเป็น Newtonian fluid ค่า n จะเท่ากับ 1 ทำให้ μ เท่ากับ K และความหนืดของอาหารมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับ shear rate หรือ rotational speed ส่วนของไหลชนิด Pseudoplastic จะมีค่า n มากกว่า 1 และของไหล Dilatant จะมีค่า n น้อยกว่า 1 ค่า n และ K ที่ได้จากรูป เป็นค่าคงที่เฉพาะตัวของอาหารซึ่งใช้ในการทำนายความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity, μ) ณ shear rate ต่างๆกัน ซึ่งในต่างประเทศมีการวิจัยค้นคว้าหาค่า n และ K ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดกันอย่างกว้างขวาง



รูปที่ 2.13 ลักษณะของเส้นกราฟที่ได้จากการลงจุดบนกระดาษ log-log [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างลักษณะพฤติกรรมการไหลและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะพฤติกรรม การไหล	K	n	t_0	ตัวอย่าง
นิวโตเนียน	> 0	$= 1$	0	น้ำ, น้ำผลไม้เจือจาง, น้ำมันพืช
ซูโดพลาสติก	> 0	$0 < n < 1$	0	Applesauce, Banana puree, concentrated juice
ไดลาแทนต์	> 0	$1 < n < \infty$	0	40% corn starch solution
บิงแฮม พลาสติก	> 0	1	> 0	ยาสีฟัน, ซอสมะเขือเทศ

2.2 โปรแกรม surface evolver สำหรับการสร้างโมเดลเพื่อจำลองการทำงาน

Surface evolver คือ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการทำงาน เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงลักษณะของพื้นผิว(โมเดลที่สร้าง) ที่เปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขแรงที่กำหนดให้ เช่น surface tension, gravitational energy, square mean curvature, user-defined surface integrals, knot energy เป็นต้น โปรแกรมจะนำค่าแรงต่างๆ นี้มาคำนวณร่วมกับรูปทรงที่สร้างขึ้น เพื่อให้พลังงานของพื้นผิวมีค่าต่ำสุด สุดท้ายโปรแกรมจะจำลองลักษณะพื้นผิวไปตามค่าพลังงานต่ำสุดด้วยวิธีที่เรียกว่า gradient decent method

การใช้งานโปรแกรม surface evolver จะต้องเริ่มสร้างโมเดลจำลองขึ้นก่อน หลังจากนั้นจึงกำหนดค่าตัวแปรและแรงต่างๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งทั้งหมดนี้สามารถทำใน script file ได้(เช่น text file) และบันทึกนามสกุลไฟล์เป็น(.fe) เมื่อโปรแกรมเรียก text file นั้นขึ้นมาทำงาน โปรแกรมจะทำการคำนวณและจำลองผลของลักษณะพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงตามโมเดลและเงื่อนไขที่กำหนด

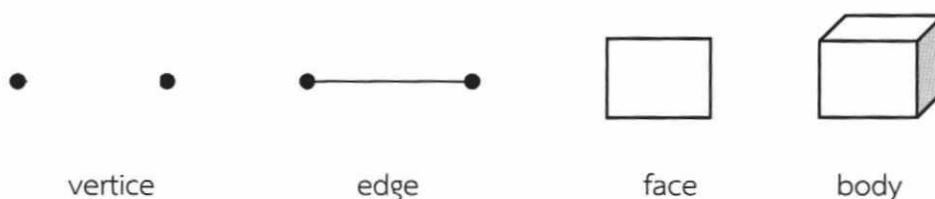
การสร้างโมเดล มีส่วนประกอบ 4 ส่วนคือ

1. vertice คือ จุด/ตำแหน่งที่กำหนดขึ้น(xyz - coordinate)
2. edge คือ เส้นที่ลากระหว่างจุด 2 จุดใดๆ
3. face คือ หน้า/ด้านของโมเดลซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นระนาบ ประกอบขึ้นจาก edge และ

เป็นรูปเรขาคณิตยกตัวอย่างเช่น ลูกเต๋ามี 6 หน้า/ด้าน

4. body คือ ตัวโมเดลทั้งหมดที่สร้างขึ้นมาจากส่วนต่างๆ 4 ส่วนซึ่งมองเห็นเป็น 3D

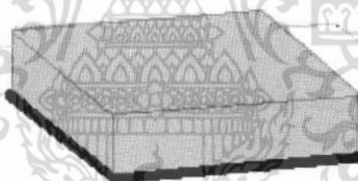
ดังแสดงในรูปโครงสร้างนี้



รูปที่ 2.14 แสดงส่วนประกอบการสร้างโมเดลในโปรแกรม surface evolver [7]

การเขียน datafile ของโปรแกรม surface evolver จะทำทีละบรรทัด โดยเริ่มจาก vertice edge face และ body ตามลำดับ โดยใช้คำดังกล่าวเป็น syntax เพื่อสร้างแต่ละหน่วยย่อยๆ และแต่ละหน่วยย่อยๆ จะถูกกำหนดกำหนดด้วยตัวเลขเพื่อใช้สำหรับอ้างอิง การสร้าง face อาจเห็น edge ที่เป็นลบ ซึ่งหมายถึง edge ใน face นั้นสลับทิศทางการที่กำหนดไว้ในการสร้าง edge และการสลับทิศทางการนั้นเกิดจากการวนรอบ edge เพื่อให้ face นั้นเป็น outward normals โดยพิจารณาจากกฎมือขวาและในการวนรอบก็อาจจะมี edge ที่มีทิศตรงข้ามกับที่ได้กำหนดไว้

การคำนวณค่าพลังงานจะใช้คำว่า constraint โดยกำหนดสมการและแรงในแนวแกนใดๆ (x,y และ/หรือ z) โดยใช้ทฤษฎีของกรีนส์ดังนี้



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของโมเดลสำหรับการกำหนดแรงที่บริเวณเส้นสัมผัส [7]

ตัวอย่างในรูปนี้เป็นการจำลองโมเดลของเหลวที่ตั้งอยู่บนพื้นผิวโดยมีแรงโน้มถ่วงกระทำอยู่ มุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวและพื้นผิวสามารถกำหนดได้ และในการจำลองค่ามุมสัมผัสต่างๆ ของของเหลวบนพื้นผิวทำได้โดยไม่นำหน้าที่หกของลูกบาศก์(ด้านล่าง)มาพิจารณา แต่จะใช้วิธีการใส่แรงที่ได้จากการอินทิเกรตแรงที่ได้จากหน้านั้นให้กับ edge รอบๆ หน้านั้นแทนซึ่งมีค่าพลังงานเหมือนกับการนำหน้าที่หกเข้าไปคำนวณด้วย โดยใช้สมการกรีนส์ [8] คือ

$$\iint_{\text{face6}} T \bar{k} \cdot d\bar{s} = \int_{\partial(\text{face6})} \bar{w} \cdot d\bar{l} \quad (2.5)$$

123042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ T คือ พลังงานที่พื้นผิวสัมผัสของหน้าที่หก (T ในที่นี้คือ ค่าความตึงผิว)

สิ่งที่ต้องการคือ $\text{curl } \vec{w} = T\vec{k}$ ซึ่งจะได้ว่า $\vec{w} = -T_y\vec{i}$ ดังนั้นจะต้องใส่แรง $-T_y$ ลงในแกน x ดังตัวอย่าง

```

PARAMETER angle = 90 // internal angle between plane and surface, degrees
#baseline T = (-cos(angle)*y/L) // virtual tension at facet on plane

constraints {
  // the cable tag *
  formula: x3 = 1
  energy: // for contact angle
  e1: -T*y
  e2: 0
  e3: 0

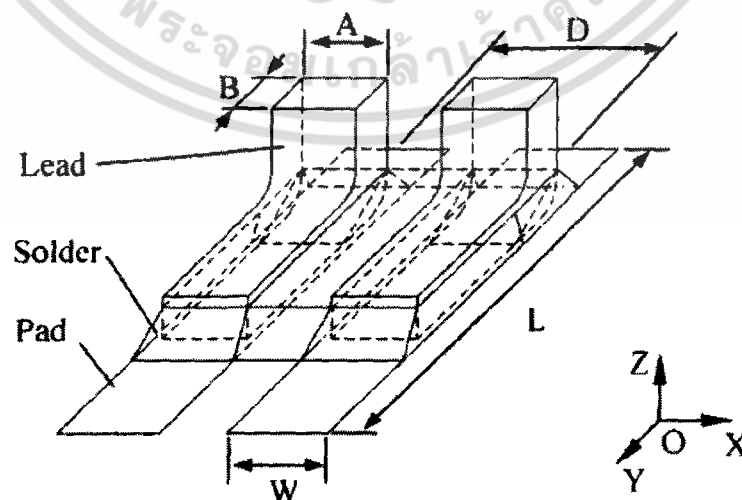
```

รูปที่ 2.16 แสดงการกำหนดแรงลงในแกน e1-e3 สำหรับการคำนวณพลังงานในโปรแกรม

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้โปรแกรม surface evolver

การใช้โปรแกรม surface evolver เพื่อวิเคราะห์การเกิดโซลเตอร์บริดจ์ โดย Li Ming Yu และ Wang Chun Qing[9] ใช้โปรแกรมนี้เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ และค่าวิกฤตของพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดโซลเตอร์บริดจ์สำหรับอุปกรณ์ไอซี (IC - QFP256 : Quad Flat Packaging) การสร้างโมเดล 3D เพื่อจำลองลักษณะการเกิดโซลเตอร์บริดจ์นั้นประกอบด้วย ขาของอุปกรณ์(pad) และ ตะกั่ว(solder) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตะกั่ว และรายละเอียดของโครงสร้าง แสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 โมเดลโครงสร้างของอุปกรณ์ IC-QFP256 และ pad ที่จะเชื่อมด้วยตะกั่ว [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของตะกั่วหลอมเหลว

Density (kg m ⁻³)	Surface tension (10 ⁻³ N m)	Wetting angle
7033.4	470	12 deg

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของโมเดล

Parameters	L	W	D	A	B
Size (× 10 ⁻² m)	0.13	0.024	0.04	0.02	0.01

สมการโมเดลทางคณิตศาสตร์(Math Model) ที่ใช้เพื่อกำหนดแรง(Force)ค่าต่างๆ ให้กับตะกั่วเพื่อให้โปรแกรมสามารถจำลองการทำงานได้แสดงดังสมการ [9]

$$I = \iint_{A_0} T dA + \sum_{i=1}^n \iint_{A_i} T_i dA + \iiint_V \rho g z dV + \lambda (\iiint_V l dv - V_0) \quad (2.6)$$

โดยที่	T	ค่าแรงตึงผิว(surface tension) ของตะกั่ว
	T_i	แรงที่ให้กับพื้นที่ที่สัมผัสกับตะกั่ว
	A	พื้นที่ของบริเวณที่กำหนดให้เป็นตะกั่ว
	A_i	พื้นที่ที่ตะกั่วสัมผัสกับ pad หรือ lead
	n	จำนวนตำแหน่งที่ตะกั่วสัมผัสกับ pad หรือ lead
	ρ	ความหนาแน่นของตะกั่ว(density)
	g	แรงโน้มถ่วง(gravity)
	V	ปริมาตรตะกั่วที่หลอมเหลว
	V_0	ปริมาตรตะกั่วเริ่มต้นที่กำหนดให้โปรแกรม
	λ	Lagrange multiplier

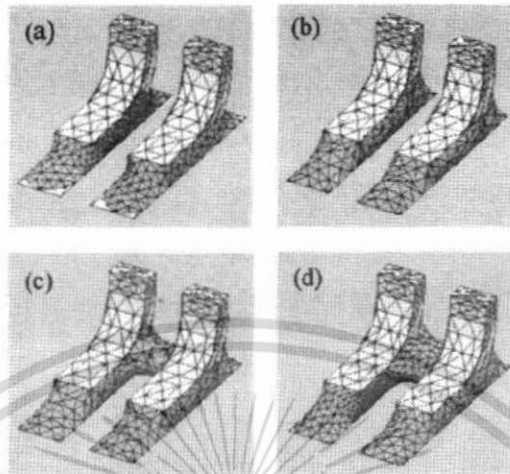
ถ้าการคำนวณของโปรแกรมเข้าไปถึงรูปแบบของสมการ Euler-Lagrange แล้วโปรแกรมจะสามารถจำลองรูปทรงสุดท้ายของตะกั่วที่เปลี่ยนแปลงจากเริ่มต้นได้

พารามิเตอร์ที่งานวิจัย[9] ศึกษาว่าจะมีผลต่อการเกิดโซลเดอร์บริดจ์ ได้แก่ ปริมาตรตะกั่ว มุมเหลวเปียก และแรงตึงผิวของตะกั่ว ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

-ปริมาตรตะกั่ว (solder volume)

ผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงให้เห็นว่าที่ปริมาตรตะกั่วค่าต่างๆ ทำให้การเชื่อมระหว่างขาของไอซีและฐานรองมีความพอดี ดังในรูปที่ 2.18(a), (b) และมากเกินไปจนทำให้เกิดโซลเดอร์บริดจ์ ดังรูป 2.19(c), (d) ซึ่งค่าปริมาตรของตะกั่วที่พอดีทำให้เกิดโซลเดอร์บริดจ์นี้เรียกว่า ค่าวิกฤต(critical

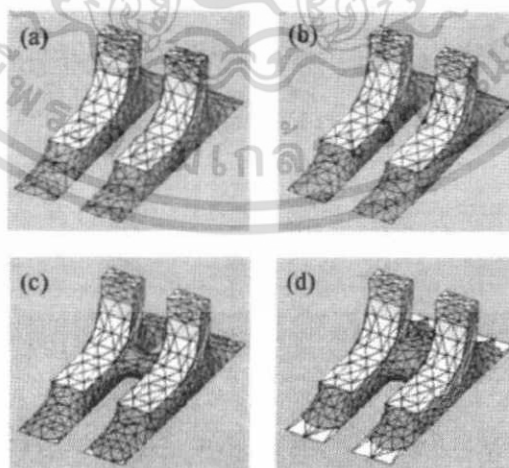
solder volume: V_c) โดยที่ค่าปริมาตรวิกฤตของตะกั่วสำหรับการเกิดโซลเดอร์บริดจ์ของขาอุปกรณ์ไอซีตัวนี้มีค่าเท่ากับ $3.16 \times 10^{-11} \text{ m}^3$



รูปที่ 2.18 การเชื่อมระหว่างฐานไอซีและขาของด้วยตะกั่วปริมาตรต่างๆ (a) $2.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3$, (b) $3.10 \times 10^{-11} \text{ m}^3$, (c) $3.18 \times 10^{-11} \text{ m}^3$ และ (d) $3.22 \times 10^{-11} \text{ m}^3$ [9]

- มุมเปียก (wetting angle)

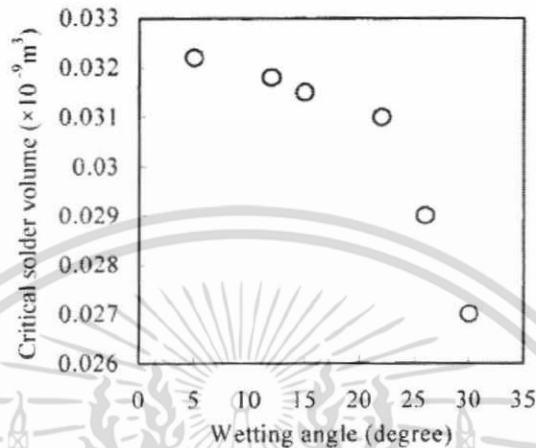
ผลของมุมเปียกที่มีต่อการเกิดโซลเดอร์บริดจ์แสดงดังรูปที่ 2.18 โดยกำหนดให้ค่าปริมาตรของตะกั่วมีค่าคงที่ $3.1 \times 10^{-11} \text{ m}^3$ แต่ค่ามุมเปียกเปลี่ยนแปลงโดยเพิ่มขึ้นจาก 5° , 22° , 23° และ 30° ผลปรากฏว่าที่มุมเท่ากับ $5-22^\circ$ ยังไม่เกิดโซลเดอร์บริดจ์ระหว่างคู่ของขาไอซี แต่หลังจากเพิ่มค่ามุมขึ้นเป็น 23° จะทำให้เกิดโซลเดอร์บริดจ์ จนกระทั่งที่มุมเหลวเปียกมีค่าเท่ากับ 30° พบว่าปริมาตรของโซลเดอร์บริดจ์มีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากตะกั่วไม่สามารถไหลไปทั่วฐานรองได้อย่างอิสระจึงทำให้ตะกั่วถูกบีบออกมานอกฐานรอง ดังเช่นรูปที่ 2.19(d)



รูปที่ 2.19 ผลจากค่ามุมเปียกที่มีต่อการเกิดโซลเดอร์บริดจ์ ($V = 3.10 \times 10^{-11} \text{ m}^3$, (a) 5° , (b) 22° , (c) 23° และ (d) 30° [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเปียกและค่าปริมาตรวิกฤต(V_c) แสดงดังรูปที่ 2.20 จากกราฟพบว่าเมื่อค่ามุมเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาตรตะกั่วที่ทำให้เกิดโซลเดอร์บริดจ์(V_c) มีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะเมื่อมุมเปียกมีค่ามากขึ้นทำให้ตะกั่วไหลกระจายบนฐานรองได้น้อยลงจึงทำให้ความหนาแน่นของตะกั่วส่วนใหญ่ไหลมาอยู่ที่ด้านข้างแล้วเกิดโซลเดอร์บริดจ์ทั้งๆ ที่ปริมาตรตะกั่วมีค่าลดลงดังรูปกราฟ

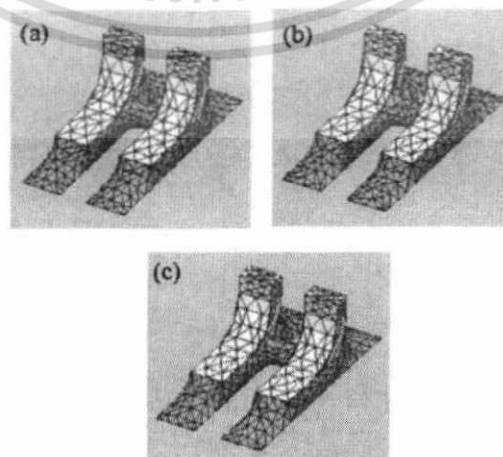


รูปที่ 2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเปียกและปริมาตรวิกฤตของตะกั่ว [9]

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเปียก(wetting angle) และปริมาตรวิกฤต(critical solder volume) มีประโยชน์มากสำหรับการนำไปวิเคราะห์หาความเหมาะสมระหว่างค่าปริมาตรตะกั่วที่จะใช้เชื่อมกับวัสดุที่มีสภาพพื้นผิวแตกต่างกันไป และเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดโซลเดอร์บริดจ์ปริมาตรตะกั่วที่ใช้ควรมีค่าน้อยกว่าค่าปริมาตรวิกฤตที่มุมเปียกนั้นๆ

-แรงตึงผิวของตะกั่ว(surface tension)

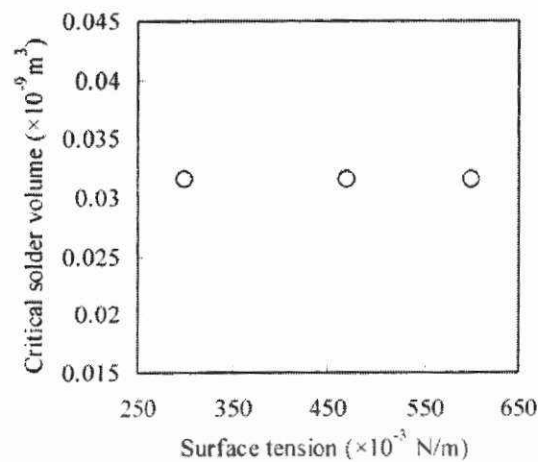
กรณีศึกษาผลจากแรงตึงผิวนั้น กำหนดให้ตะกั่วแต่ละชนิดมีค่าแรงตึงผิวต่างๆ กันแต่คุณสมบัติด้านอื่นๆ ยังคงเหมือนกัน โดยที่ค่ามุมเปียกและปริมาตรของตะกั่วคงที่ ผลปรากฏว่าลักษณะการเกิดโซลเดอร์บริดจ์ในแต่ละรูปที่ 2.21 ไม่แตกต่างกัน และแสดงได้ด้วยกราฟในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.21 ผลของแรงตึงผิวที่มีต่อการเกิดโซลเดอร์บริดจ์($V_c = 3.18 \times 10^{-11} \text{ m}^3$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้

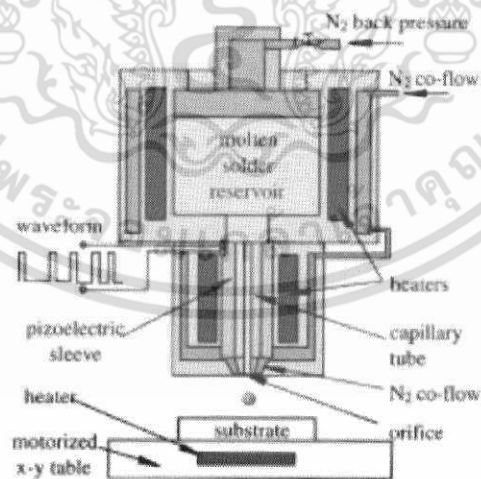
(a) $T=300 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, (b) $T=470 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, (c) $T=600 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ [9]



รูปที่ 2.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวและปริมาตรวิกฤตของตะกั่ว [9]

2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคนิคแฟลชโฟโตกราฟีเพื่อการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของของไหล

การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของของไหลมีหลายวิธี เช่น การใช้กล้องความเร็วสูง แฟลชโฟโตกราฟี และแฟลชวิดีโอกราฟี เป็นต้น ความแตกต่างระหว่างการใช้กล้องความเร็วสูงและแฟลชโฟโตกราฟี คือ แฟลชโฟโตกราฟีจะสร้างเหตุการณ์ซ้ำหลายๆ ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะใช้เพียง 1 เฟรมสำหรับบันทึกภาพ ในขณะที่กล้องความเร็วสูงจะบันทึกภาพเหตุการณ์หนึ่งด้วยจำนวนเฟรมสูงสุดแต่มีการใช้งานยุ่งยากและราคาแพง Poulidakos และคณะ [10] ใช้วิธีแฟลชวิดีโอกราฟีเพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของตะกั่ว (Sn63Pb37) โดยรายละเอียดอุปกรณ์ตัวเครื่อง และการจัดอุปกรณ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 2.23 และ 2.24 ตามลำดับ

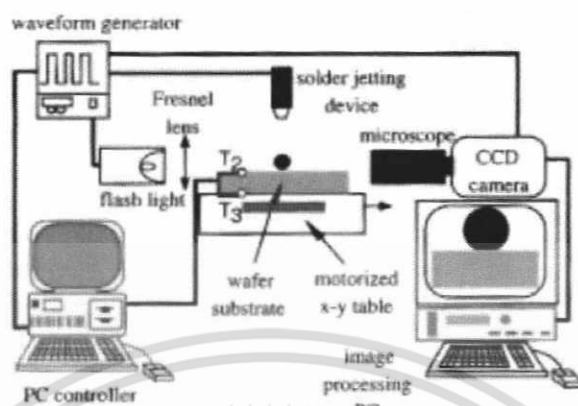


รูปที่ 2.23 เครื่องหยดตะกั่วหลอมเหลวที่ใช้ในการทดลอง [10]

เครื่องหยดตะกั่วภายในถังบรรจุตะกั่วหลอมเหลวซึ่งควบคุมระดับอุณหภูมิด้วยตัวให้ความร้อน (Heater) สัญญาณพัลส์ทางไฟฟ้าควบคุมการหยดผ่านอุปกรณ์ piezoelectric sleeve โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันจากการอัดก๊าซไนโตรเจนดันให้ตะกั่วหยดจากปลายกระบอก นอกจากนี้ก๊าซไนโตรเจนยังช่วยให้หยดตะกั่วที่หยดออกมาไม่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศภายนอก



รูปที่ 2.24 แสดงระบบการบันทึกภาพด้วยวิธีแฟลชโฟโตกราฟี [10]

การจัดอุปกรณ์ระบบถ่ายภาพด้วยวิธีแฟลชโฟโตกราฟี ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ระบบถ่ายภาพ ระบบการควบคุมหยด(เครื่องหยดในรูปที่ 2.23) และระบบการวัดและแสดงผล โดยสัญญาณพัลส์จะควบคุมช่วงเวลาให้มีความสอดคล้องกันพอดีระหว่างจังหวะเวลาของการหยดตะกั่วเหลว การถ่ายภาพและการปล่อยแสงแฟลช ในการทดลองต้องติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ไว้ที่ด้านบน(ตำแหน่ง T_2 ในรูปที่ 2.24) และด้านล่าง(T_3 ในรูปเดียวกัน) ของแผ่นเวเฟอร์เพื่อวัดค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขของการทดลอง

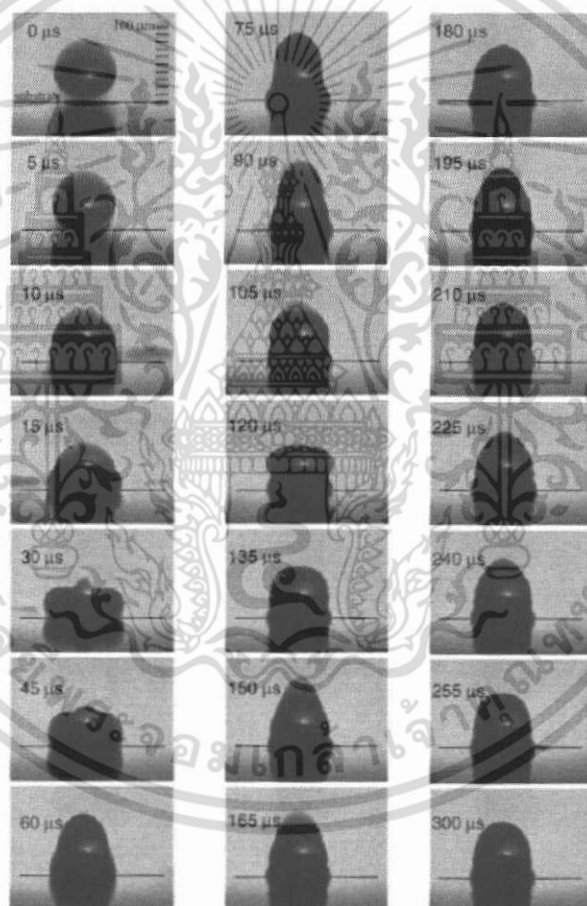
การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ตอนตามวัตถุประสงค์ของการทดลองคือ การทดลองตอนที่ 1 เมื่อวัดระยะเวลาการขยายตัว(spreading) ของตะกั่วบนพื้นผิว และความสูงของตะกั่วหลอมเหลวเมื่อตกกระทบพื้นผิวที่เวลาต่างๆ โดยเงื่อนไขการทดลองกำหนดให้ความเร็วหยดตะกั่วคงที่ 1.52 m/s แต่อุณหภูมิบนแผ่นซับสเตรต(ตำแหน่ง T_2) เปลี่ยนแปลงดังแสดงในตารางที่ 2.4 ตัวอย่างผลการทดลองที่อุณหภูมิ 48°C ความเร็ว 154 m/s แสดงดังรูปที่ 2.25 การทดลองตอนที่ 2 เพื่อวัดค่ามุมเปียก(wetting angle) ระหว่างหยดตะกั่วหลอมเหลวบนพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ โดยกำหนดให้หยดของเหลวมีความเร็วเริ่มต้นค่าต่างๆ และอุณหภูมิบนแผ่นซับสเตรตเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าต่างจากการทดลองตอนที่ 1 ดังตารางที่ 2.5 ผลการทดลองที่ความเร็ว 1.49 m/s และอุณหภูมิบนแผ่นซับสเตรต 135°C แสดงดังรูป 2.26

ค่าพารามิเตอร์ที่การทดลองนี้ใช้สำหรับวัดการขยายตัวของหยดตะกั่ว เรียกว่า ปัจจัยการขยายตัว(spread factor, β) มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางที่หยดตะกั่วไหลเกาะอยู่บนพื้นผิวกับเส้นผ่าศูนย์กลางนี้เมื่อเริ่มต้น ผลการทดลองในรูปที่ 2.25 แสดงค่าเวลาที่หยดตะกั่วขยายตัวมากที่สุดซึ่งจะสิ้นสุดอยู่ที่เวลาประมาณ 30 μ s

ตารางที่ 2.4 เงื่อนไขเบื้องต้นในการทดลองตอนที่ 1 [10]

v_0 (m/s)				1.52 ± 0.06		
T_{20} (°C)	48	62	81	98	118	135
Re				381		
We				4.4		
Ste	0.77	0.69	0.58	0.48	0.37	0.27
Oh				0.0055		
Pt				0.025		

เปรียบเทียบการทดลองในรูปที่ 2.25 และ 2.26 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 135°C ทำให้ค่า β_{\max} มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่การเพิ่มขึ้นของค่า β_{\max} เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนี้มีสมมติฐานมาจาก “การถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวแผ่นซึบสเตรตกับหยดตะกั่ว มีผลทำให้ระยะเวลาที่ตะกั่วเริ่มแข็งตัวเพิ่มขึ้น”



รูปที่ 2.25 แสดงภาพการขยายตัว การสั่นตัว และการแข็งตัวของหยดโลหะบนเนื้อสาร โดยที่ อุณหภูมิบนเนื้อสาร $T_2 = 48^{\circ}\text{C}$, $v_0 = 1.54 \text{ m/s}$ และ $d_0 = 80 \mu\text{m}$ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

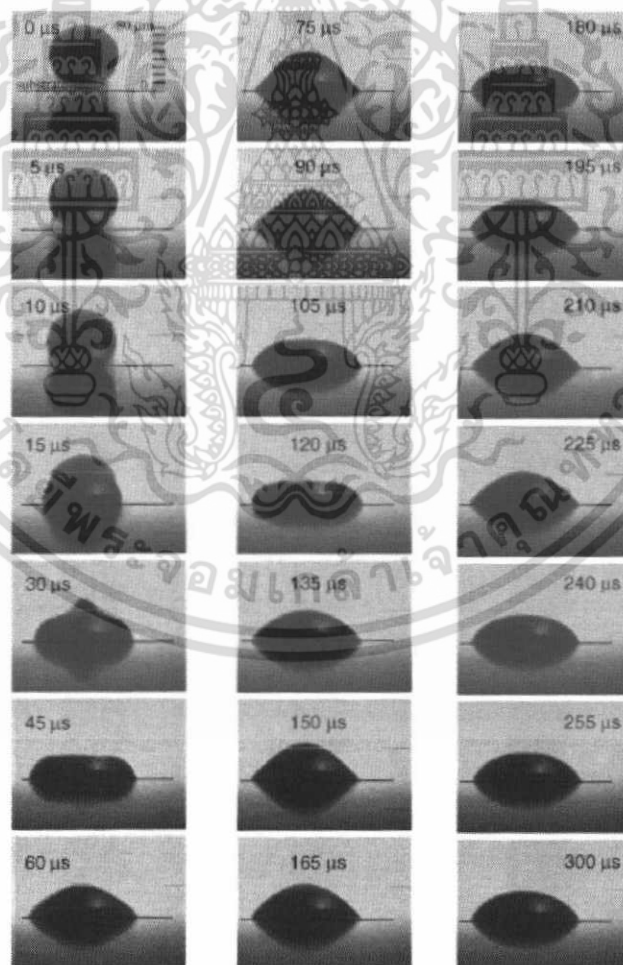
ตารางที่ 2.5 เงื่อนไขเบื้องต้นในการทดลองตอนที่ 2

v_0 (m/s)	2.35	2.31	1.49	1.51
T_{20} (°C)	145	59	65	119
Re	546	537	348	350
We	9.7	9.4	3.9	4.0
Ste	0.22	0.70	0.67	0.36
Oh	0.0057	0.0057	0.0057	0.0057
Pr	0.025	0.025	0.025	0.025

จากรูปผลการทดลองทั้งสองตอน สังเกตได้ว่าผลการทดลองในตอนที่ 1 หยดตะกั่วเกิดการสั่นตัวมากกว่าผลจากการทดลองที่ 2 ทั้งนี้เพราะหยดตะกั่วในการทดลองตอนที่ 1 ใช้เวลาในการแข็งตัวเร็วกว่าการทดลองตอนที่ 2 จึงทำให้ปริมาตรของตะกั่วในส่วนที่ยังเป็นมีสถานะเป็นตะกั่วเหลวอยู่นั้นมีค่าลดลง ซึ่งถ้าพิจารณาตามความสัมพันธ์ของสมการความถี่ธรรมชาติของหยดของเหลวตั้งสมการที่ 2.7 แล้วจะพบว่าเมื่อปริมาตรของหยดตะกั่วส่วนที่มีสถานะเป็นของเหลวลดลงจะทำให้ความถี่(การกระเพื่อมหรือการสั่นตัว)ของหยดตะกั่ว มีค่าเพิ่มขึ้น [10]

$$f \propto (\sigma / \rho_l V_l)^{1/2}$$

(2.7)

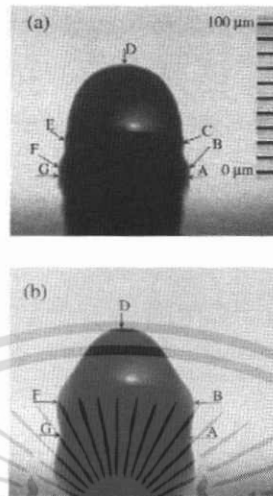


รูปที่ 2.26 แสดงภาพการขยายตัว การสั่นตัว และการแข็งตัวของหยดโลหะบนเนื้อสาร

โดยที่ อุณหภูมิบนแผ่นซับสเตรต $T_2 = 135^\circ\text{C}$, $v_0 = 1.49$ m/s และ $d_0 = 84$ μm [10]

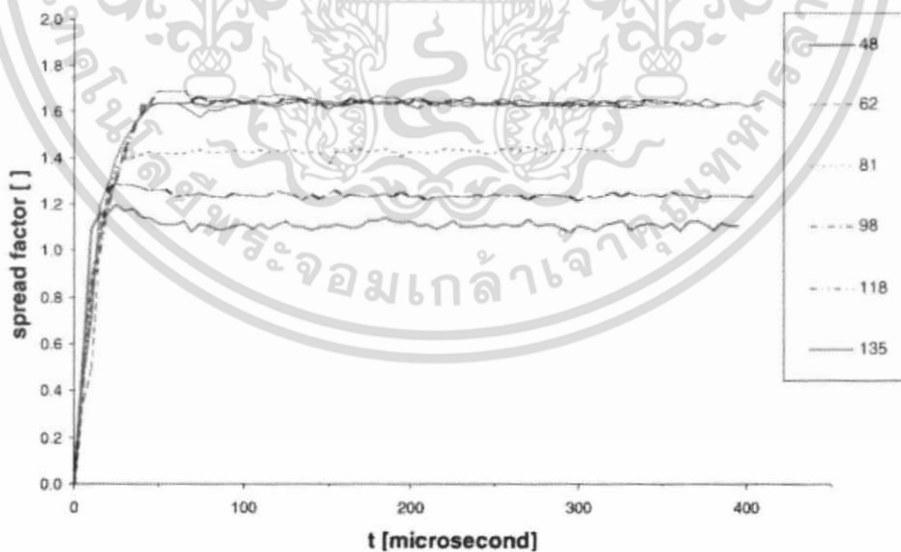
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองการวัดค่าปัจจัยการขยายตัว (β) และความสูงของหยดตะกั่วบนพื้นผิวสำหรับผลการทดลองตอนที่ 1 แสดงด้วยกราฟดังรูปที่ 2.28 และ 2.29 ตามลำดับ โดยมีวิธีการวัดแสดงดังรูปที่ 2.27



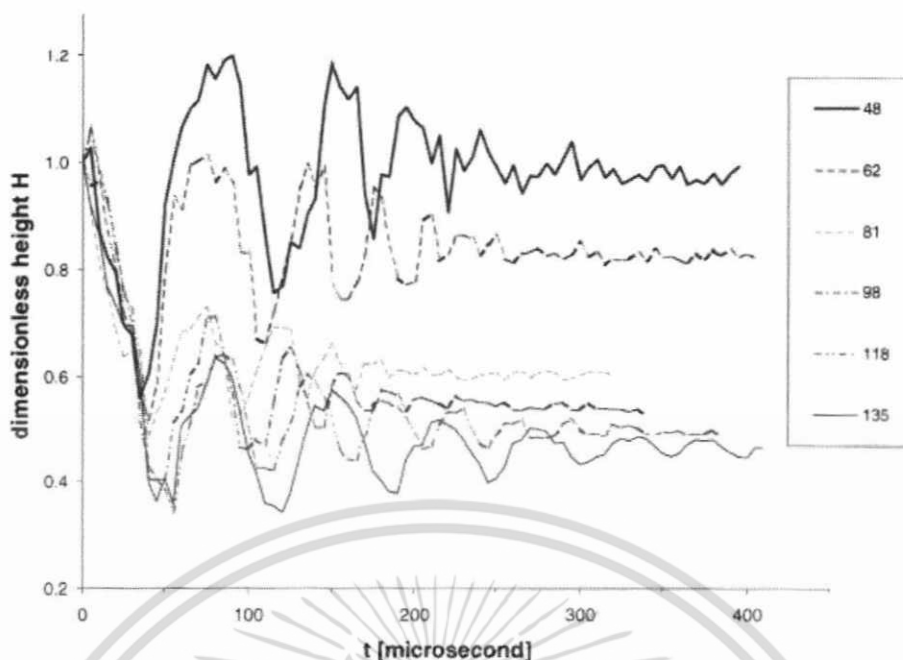
รูปที่ 2.27 ตำแหน่งที่วัดบนพื้นผิวหยดของเหลว ตำแหน่ง AG แสดงระยะการขยายตัวของหยดตะกั่ว และตำแหน่ง D แสดงความสูงหยดของเหลว [10]

หลังจากหยดตะกั่วตกกระทบพื้นผิวระยะการขยายตัวของหยดของเหลวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องประมาณ $15 \mu\text{s}$ ระยะการขยายตัวสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวซับสเตรท (T_2) เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 98° แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่าค่านี้การขยายตัวของตะกั่วจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงอีก ซึ่งอาจหมายถึงการแข็งตัวไม่มีผลต่อการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง



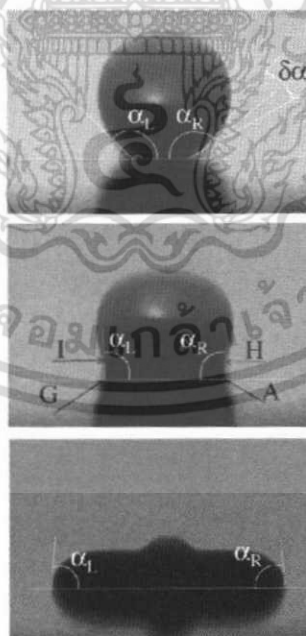
รูปที่ 2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยการขยายตัวกับเวลา [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



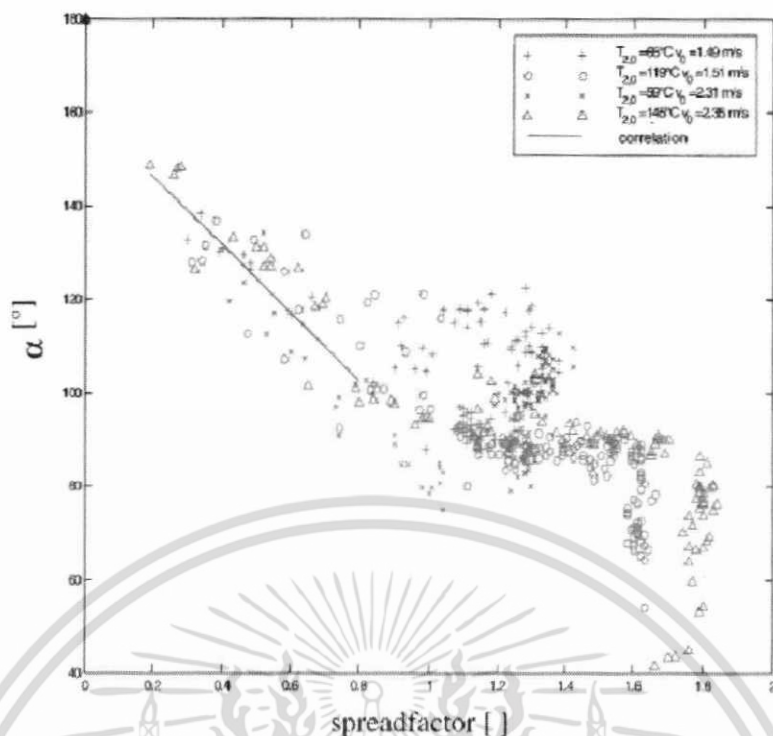
รูปที่ 2.29 ความสูงของหยดตะกั่ว(H) ที่อุณหภูมิบนพื้นผิวซัสเตรต(T_2) ค่าต่างๆ [10]

ความสูงหยดของหยดตะกั่วมีลักษณะลดลง และเพิ่มขึ้นสลับกันแสดงให้เห็นว่าหยดตะกั่วเมื่อตกกระทบพื้นมีการสั่นตัวคล้ายคลื่น ในการทดลองตอนที่ 2 วิธีการวัดค่ามุมเปียก และผลการวัดค่ามุมเปียกแสดงดังรูปที่ 2.30 และ 2.31 ตามลำดับ



รูปที่ 2.30 วิธีการหาค่ามุมทางด้านซ้าย (IGA) และทางด้านขวา (HAG) [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเปียก และการขยายตัวที่ความเร็ว (V_0) ค่าต่างๆ [10]

ค่ามุมเปียกที่ความเร็ว (V_0) ของหยดตะกั่วหลอมเหลวค่าต่างๆ มีแนวโน้มลดลงในช่วงแรก และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเปียก และการขยายตัวได้ด้วยสมการ 2.10 แต่ที่ $\beta > 0.8$ ค่ามุมเปียกไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ(2.10)ดังกล่าวได้เนื่องจากผลการทดลองแตกต่างกัน

$$\alpha(\beta) = 160 \text{ deg} - 71\beta ; \quad \beta < 0.8 \quad (2.8)$$

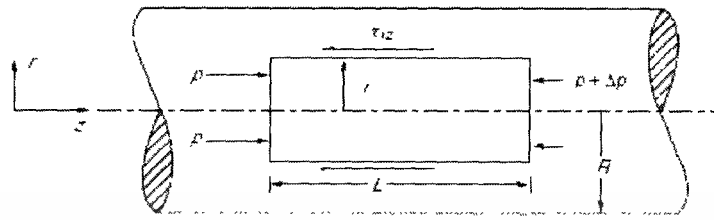
โดยที่ $\alpha(\beta)$ = ค่ามุมเปียกที่ spread factor (β) ค่าใดๆ
deg = degree

2.3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าพารามิเตอร์ของของเหลวเพื่อควบคุมขนาดหยดของเหลว

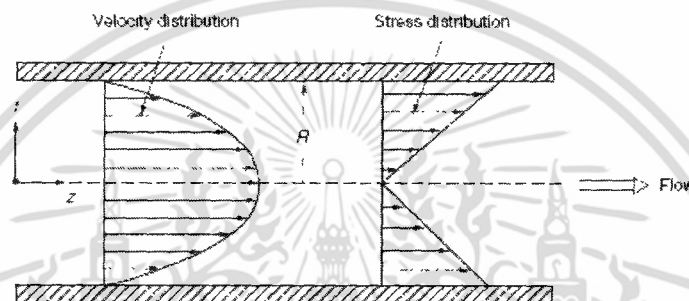
ค่าพารามิเตอร์ของของเหลวมีส่วนสำคัญสำหรับการออกแบบเพื่อควบคุมให้ขนาดของหยดของเหลวคงที่ โดยได้รับความสนใจมาโดยตลอด Han-Xiong Li และคณะ [11] ตระหนักถึงปัญหาพื้นฐานที่ทำให้ระบบหยดมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ คือ ระดับของเหลวที่บรรจุในท่อรูปทรงกระบอกเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงได้ออกแบบการศึกษาโดยใช้โปรแกรม CFD (computational fluid dynamics) เพื่อจำลองหาค่าอัตราการไหล (flow rate, Q) ของ Newtonian และ non-Newtonian Fluid โดยเปรียบเทียบผลอัตราการไหลที่ได้จาก fluid flow model ทั้ง 3 แบบซึ่งเหมาะสมกับชนิดของเหลวแตกต่างกันไปกับผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม CFD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาอัตราการไหลภายในท่อพิจารณาจากโมเดลในรูป 2.32(a) ท่อมีรัศมีภายใน ณ จุดใด ๆ เท่ากับ r และรัศมีภายนอกเท่ากับ R ของไหลภายในท่อไหลด้วยความเร็วแตกต่างกันตามค่ารัศมี ณ จุดใดๆ ดังแสดงในรูป 2.32(b) และสามารถหาค่าอัตราการไหล(flow rate) ได้จากสมการ(2.9)



(a) โครงสร้างแสดงการไหลภายในท่อสำหรับการคำนวณ



(b) แรงเฉือน(shear stress) และการกระจายความเร็ว(velocity distribution: u_z)

ของของไหลที่รัศมีค่าต่างๆ

รูปที่ 2.32 โครงสร้าง pipe flow model

$$Q = \int_0^R 2\pi r u_z(r) dr \quad (2.9)$$

และปริมาตรหยดของเหลว;

$$V = \int Q dt \quad (2.10)$$

เมื่อ r = รัศมีจากจุดศูนย์กลางถึงตำแหน่งใดๆ ในท่อ

$u_z(r)$ = ความเร็วของไหล(fluid velocity) แตกต่างกันตามชนิดของเหลวที่ใช้

V = ปริมาตรหยดของเหลวจากอัตราการไหลภายในช่วงระยะเวลานั้น

สมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการไหลในของเหลวแต่ละประเภทมีดังนี้

1. Newtonian Fluid;

$$\tau = -\mu \frac{du}{dr} \quad (2.11)$$

2. non-Newtonian Fluid แบ่งออกเป็น

2.1 Power-law fluid;

$$\tau = K \left(-\frac{du}{dr} \right)^n \quad (2.12)$$

2.2 General Power-law fluid;

$$\tau = K \left(-\frac{du}{dr} \right)^n + \tau_y \quad (2.13)$$

เมื่อ τ = แรงเฉือน (shear stress)
 μ = ความหนืด (viscosity)
 K = ดัชนีค่าคงที่ (consistent index)
 τ_y = yield stress
 n = power-law index
 $\frac{du}{dr}$ = shear rate

สมดุลระหว่างแรงดัน และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการไหลในท่อ (รูปที่ 2.32(a)) สัมพันธ์กันดังสมการ

$$p(\pi r^2) - (p + \Delta p)(\pi r^2) = \tau_{rz} (2\pi rL) \quad (2.14)$$

ดังนั้น

$$\tau_{rz} = \left(-\frac{\Delta p}{L} \right) \left(\frac{r}{2} \right) \quad (2.15)$$

แรงเฉือนที่ผนังท่อ ($r = R$);

$$\tau_w = \left(\frac{R}{2} \right) \left(\frac{-\Delta p}{L} \right) \quad (2.16)$$

พิจารณาสมการ (2.16) ร่วมกับสมการ (2.11) – (2.13) สามารถพิสูจน์สมการหาความเร็วในของไหลแต่ละประเภทได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Newtonian Fluid;

$$u_z(r) = \frac{R^2}{4\eta L} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \Delta p ;$$

ดังนั้นอัตราการไหล(Q) ซึ่งพิจารณาจากสมการ(2.9) และปริมาตรหยดของเหลว(V) (2.10) จึงเขียนใหม่ได้ดังสมการ(2.13) และ(2.14) ตามลำดับดังนี้

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu L} \Delta p = K_0 \Delta p \quad (2.13)$$

$$V = K_0 \int \Delta p dt \quad (2.14)$$

เมื่อ $K_0 = \frac{\pi R^4}{8\eta L}$
 Δp = แรงดันภายในท่อ
 R = รัศมีจากจุดศูนย์กลางจนถึงผนังท่อ
 μ = ความหนืด(เท่ากับอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือน)
 L = ความยาวท่อ

Power -law fluid;

$$u_z(r) = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta p}{2Lk} \right)^{\frac{1}{n}} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right) ;$$

ดังนั้น

$$Q = \frac{n\pi R^3}{3n+1} \left(\frac{R}{2Lk} \right)^{1/n} \Delta p^{1/n} = K_0 \Delta p^N \quad (2.15)$$

$$V = K_0 \int \Delta p^N dt \quad (2.16)$$

เมื่อ $K_0 = \frac{n\pi R^3}{3n+1} \left(\frac{R}{2Lk} \right)^{\frac{1}{n}}$
 $N = \frac{1}{n}$, N คือ จำนวนจริงบวก(real number)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Generalized Power-law fluid;

$$u_z = \frac{1}{k^{1/n}} \frac{2L}{\Delta p} \frac{n}{n+1} \left\{ \left(\frac{R\Delta p}{2L} - \tau_y \right)^{\frac{n+1}{n}} - \left(\frac{r\Delta p}{2L} - \tau_y \right)^{\frac{n+1}{n}} \right\}, \quad r_0 \leq r < R$$

$$u_z = \frac{2nL}{k^{1/n} \Delta p (n+1)} \left(\frac{R\Delta p}{2L} - \tau_y \right)^{(n+1)/n}, \quad 0 \leq r < r_0;$$

ดังนั้น

$$Q = K_1 \Delta p^N + K_2 \Delta p^{N-1} + K_3 \Delta p^{N-2} \quad (2.17)$$

$$V = K_1 \int \Delta p^N dt + K_2 \int \Delta p^{N-1} dt + K_3 \int \Delta p^{N-2} dt \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$N = \frac{1}{n}$$

$$K_1 = \frac{2L\pi n R^2 C^{1+(1/n)}}{k^{1/n} (3n+1)}$$

$$K_2 = \frac{8L^2 \pi n^2 R \tau_y C^{1+(1/n)}}{k^{1/n} (2n+1)(3n+1)}$$

$$K_3 = \frac{16L^3 \pi n^3 R \tau_y^2 C^{1+(1/n)}}{k^{1/n} (n+1)(2n+1)(3n+1)}$$

และ $C = \frac{R-r_0}{2L}$ และ $\frac{2\tau_y L}{\Delta p}$

n = power-law index

τ_y = yield stress

ตามที่ยานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาความน่าเชื่อถือของสมการที่ใช้คำนวณหาอัตราการไหล ทั้ง 3 แบบโดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณอัตราการไหลจากโมเดลดังกล่าวกับผลการจำลองจากการคำนวณด้วยโปรแกรม CFD โดยแบ่งของเหลวออกเป็น 3 ชนิด จาก 4 ตัวอย่าง A-D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A แทนของเหลวชนิด Newtonian Fluid

B-D แทนของเหลวชนิด non-Newtonian Fluid ซึ่ง B&C เป็นของเหลวชนิด Power-law Fluid , B เป็น Elastosol M23 , C เป็น Bingham Plastic

และ D แทนของเหลวชนิด General Power-law fluid

คุณสมบัติเฉพาะของของเหลวแต่ละชนิด ได้แก่ consistent index, yield stress และ power-law index แสดงในตารางที่ 2.6 ผลการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของอัตราการไหลระหว่างสมการคำนวณอัตราการไหล (Q_a) และโปรแกรม (Q_n) พบว่าความแตกต่างมีค่าน้อยนั้นแสดงถึงความน่าเชื่อถือของสมการที่ใช้ในการคำนวณ

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบอัตราการไหลของของเหลวแต่ละชนิด [11]

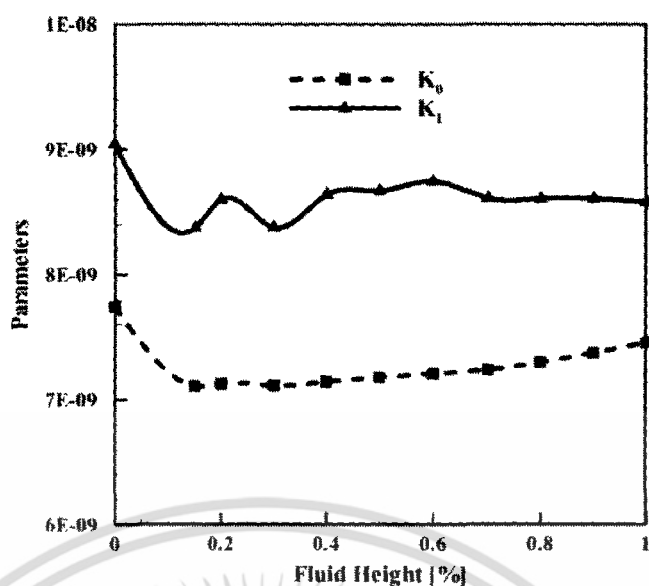
Fluid	k [Pa·s ⁿ]	τ_0 [Pa]	n	Q_a [mm ³ /s]	Q_n [mm ³ /s]	ϵ
A	24	0	1	93.4456	94.0583	0.65%
B	283.06	0	0.57	93.3671	93.6562	0.30%
C	24	150	1	91.4497	92.0775	0.69%
D	283.06	150	0.57	90.0716	90.2956	0.25%

จากผลการจำลอง และการคำนวณที่ปริมาตรของเหลวที่เหลืออยู่ในกระบอกหยดค่าต่างๆ พบว่าขนาดหยดของเหลวไม่คงที่ดังแสดงในตาราง 2.7 ดังนั้นจึงทำให้ค่าพารามิเตอร์ N และ $K_0 - K_3$ มีค่าเปลี่ยนแปลงดังแสดงด้วยกราฟในรูปที่ 2.33

ตารางที่ 2.7 ปริมาตรหยดของเหลวที่ได้จากสมการคำนวณ (V_I, V_{II}) และโปรแกรม CFD (V_N) ที่ระดับของเหลวค่าต่างๆ

Level (%)	V_N [mm ³]	V_I [mm ³]	ϵ_I (%)	V_{II} [mm ³]	ϵ_{II} (%)
100	0.2092	0.2309	10.38	0.2090	0.0815
90	0.1820	0.2024	11.21	0.1817	0.1536
80	0.1655	0.1851	11.83	0.1653	0.1640
70	0.1513	0.1701	12.42	0.1510	0.1774
60	0.1401	0.1585	13.12	0.1408	0.4816
50	0.1373	0.1554	13.17	0.1372	0.1117
40	0.1262	0.1436	13.81	0.1258	0.3292
30	0.1243	0.1415	13.84	0.1220	1.8272
20	0.1191	0.1354	13.70	0.1188	0.2690

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 ค่าพารามิเตอร์ N และ K ใดๆ ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อระดับของเหลวเปลี่ยนไป

ซึ่งวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่เหมาะสมสำหรับแต่ละระดับของเหลวนั้นพิจารณาจากการทำซ้ำด้วยวิธี least square method ในสมการ(2.19)

$$F(X_n) = F(X_{n-1}) + F_d(X_{n-1})\Delta X + \varepsilon \quad (2.19)$$

เมื่อ $F(X_n)$ คือ ปริมาตรหยดของเหลวตอนเริ่มต้น

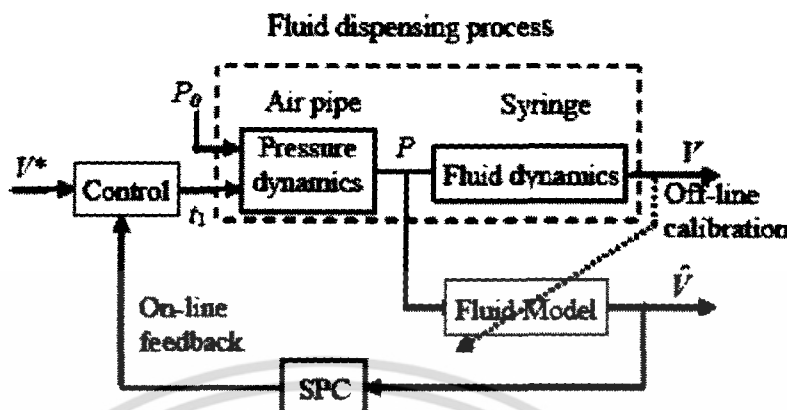
$F(X_{n-1})$ คือ ปริมาตรหยดของเหลวก่อนหน้า

$F_d(X_{n-1})$ คือ derivative function. ที่คำนวณได้จากสมการ fluid flow model ทั้ง 3 แบบโดยมีค่าพารามิเตอร์ N และ K ใดๆ เป็นตัวแปรของสมการ

ที่ระดับของเหลวค่าต่างๆ เมื่อ $F(X_n)$ ทำซ้ำจนเข้าใกล้ค่าปริมาตรที่ต้องการแล้ว จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่สนใจซึ่งอยู่ในพจน์ของ $F_d(X_{n-1})$ เป็นค่าที่เหมาะสมด้วยเช่นกัน ค่าพารามิเตอร์ N และ K ดังกล่าวถูกใช้สำหรับหาค่าปริมาตรหยดของเหลวที่เหมาะสมที่ระดับต่างๆ โดยอยู่ในส่วนของ Fluid Model ในแผนผังการควบคุมระบบหยดของเหลวดังรูป 2.34

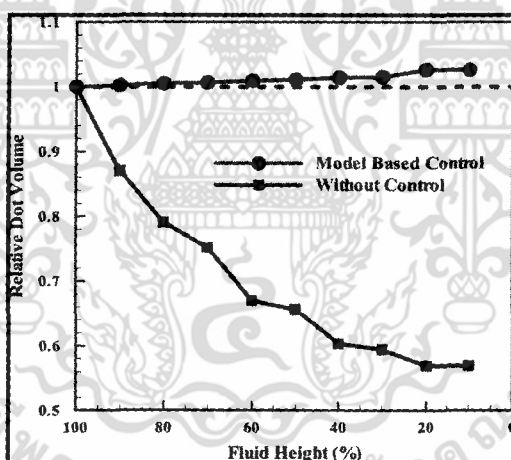
กระบวนการควบคุมระบบหยดของเหลวให้มีความแม่นยำ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ fluid dispensing process, off-line calibration และ on-line feedback control โดยที่ fluid dispensing process เป็นกลไกการจ่ายหยดของเหลว ประกอบด้วย air pipe และ syringe หลังจากที่ยหยดของเหลวแล้วจะมีการควบคุมโดยส่วนของ off-line calibration ซึ่งเป็นส่วนของการคำนวณค่าปริมาตรที่ต้องการจากค่าพารามิเตอร์ในสมการ fluid flow model หลังจากได้ค่า

ปริมาณที่เหมาะสมแล้วการทำงานส่วนของ on-line feed back จะนำค่าที่ได้จาก SPC ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความต่างเพื่อนำกลับเข้าไปชดเชยในระบบควบคุมใหม่



รูปที่ 2.34 แผนผังแสดงการควบคุมระบบหยดของเหลว

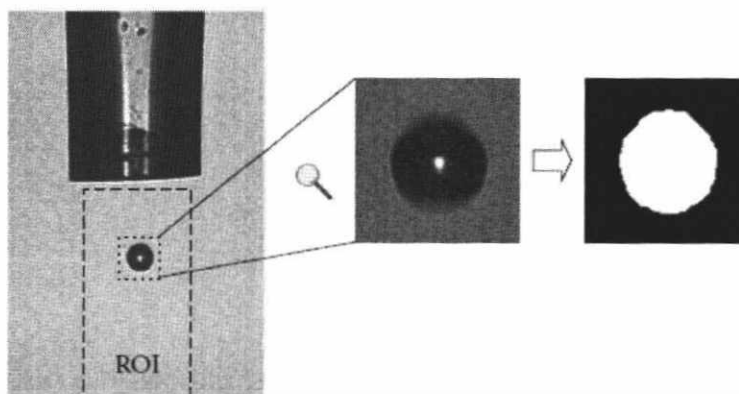
ขนาดหยดของเหลวจากการควบคุมระบบหยดของเหลวโดยใช้ fluid flow model เปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการควบคุมแสดงดังรูป 2.35 จะพบว่าในกรณีที่ไม่มีควบคุมขนาดหยดของเหลวปริมาณหยดของเหลวจะไม่คงที่



รูปที่ 2.35 ผลการจำลองขนาดหยดของเหลวกรณีควบคุมโดยใช้ fluid flow model เปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการควบคุม [11]

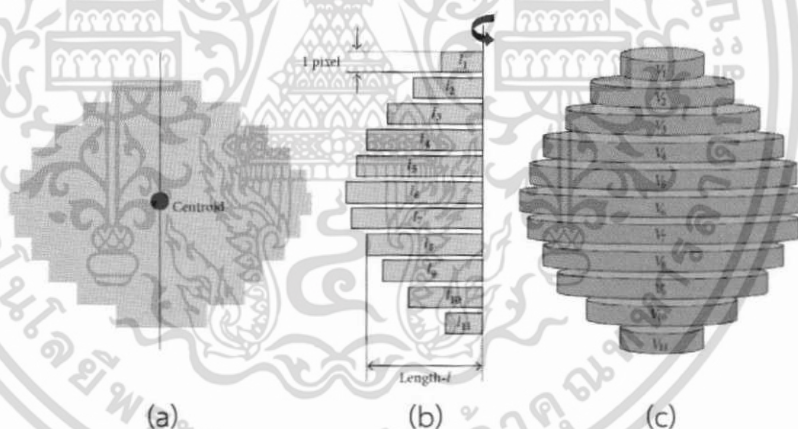
2.3.4 งานวิจัยที่นำเสนอการหาค่าปริมาตรหยดของเหลว

นาย K. Thurow และคณะได้นำเสนอวิธีการหาปริมาตรหยดของเหลวจากภาพถ่าย 2 มิติ [12] โดยใช้วิธีการทาง image processing เพื่อให้ภาพนั้นมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไปดังแสดงในรูปที่ 2.36 เป็นตัวอย่างการทำ black & white ภาพหยดของเหลวเทียบกับพื้นหลัง เพื่อดึงวัตถุที่สนใจออกจากพื้นหลัง



รูปที่ 2.36 การจัดการกับภาพ 2 มิติด้วยการทำ black & white [12]

ขั้นตอนต่อจากการทำ black & white คือ การหาปริมาตร โดยเริ่มจากการหาจุด centroid ของภาพแล้วแบ่งครึ่งตามแกนสมมาตรบนจุด centroid นี้ ดังแสดงในรูป 2.37(a) จากนั้น slice แต่ละชั้นด้วยความกว้างเท่ากับ 1 pixel แล้วหมุนชั้นส่วนที่ถูก slice ทุกชั้นนั้นด้วยระยะที่สมมาตรรอบแกนสมมาตร ดังรูป 2.37(b) สุดท้ายจึงคำนวณปริมาตรแต่ละชั้นด้วยสมการหาปริมาตรทรงกระบอก (2.20) จนครบทุกชั้นจึงได้ปริมาตรหยดของเหลวดังแสดงในภาพสุดท้าย



รูปที่ 2.37 วิธีการหาค่าปริมาตรหยดของเหลวจากภาพ 2 มิติโดยการหมุนด้วยระยะที่สมมาตรรอบแกนสมมาตร [12]

$$V_{\text{drop}} = \sum_{n=1}^L V_n = \sum_{n=1}^L \pi r_n^2 \cdot h \quad (2.20)$$

- เมื่อ r_n คือ รัศมีจากจุด centroid จนถึงขอบภาพแต่ละชั้น
 h คือ ความสูง(1 pixel)
 L คือ จำนวนชั้นทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

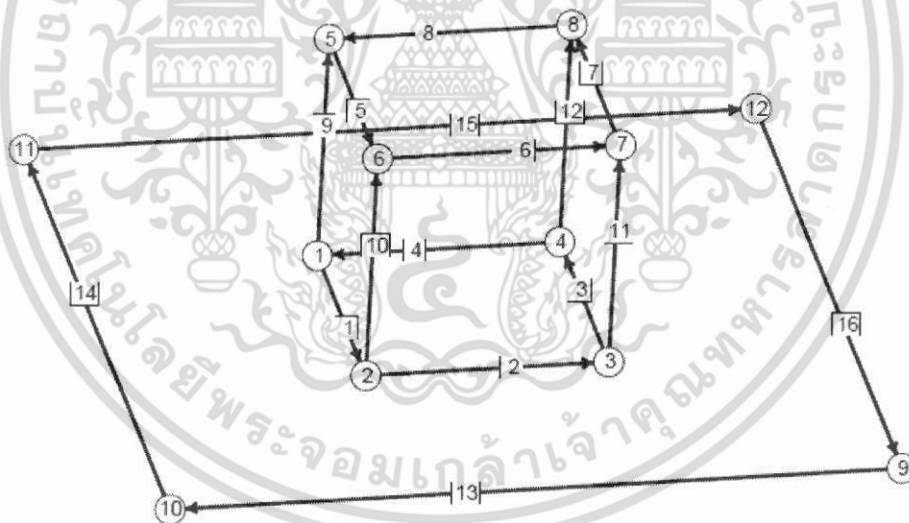
บทที่ 3

การจำลองลักษณะหยดของเหลวบนพื้นผิว และตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในงานฮาร์ดดิสก์ด้วยโปรแกรม surface evolver

3.1 การจำลองลักษณะหยดของเหลวบนพื้นผิวด้วยโปรแกรม surface evolver

3.1.1 วิธีการทดลอง

1. สร้างโมเดลเริ่มต้นสำหรับการศึกษาลักษณะหยดของเหลวบนพื้นผิวแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยกำหนดให้กล่องสี่เหลี่ยมแทนหยดของเหลว และแผ่นสี่เหลี่ยมแทนระนาบที่รองรับ สำหรับการสร้างโมเดลนี้ประกอบขึ้นจากจุด(vertices) 12 จุด และขอบ(edge) 16 ขอบ
 - ตัวกล่อง(body) สร้างจากหน้า(face) จำนวน 5 หน้า ปริมาตร(volume) กำหนดให้เท่ากับ 1 และ 2 หน่วยที่ใช้ในโปรแกรม
 - แผ่นสี่เหลี่ยม(พื้นผิวสัมผัส) เป็นแผ่นเรียบมีเฉพาะหน้า(face) ดังนั้นจึงไม่ต้องกำหนดเป็น body และ volume ในโปรแกรม



รูปที่ 3.1 การสร้างโมเดลเริ่มต้นเพื่อใช้ในโปรแกรม

2. กำหนดแรงกระทำระหว่างหยดของเหลวกับพื้นผิวด้วยสมการของยังส์ โดยกำหนดให้มุมเปียกแทนตัวแปร ANGLE มีค่าเท่ากับ 45° , 90° และ 135° ตามลำดับ และแรงตึงผิวของหยดของเหลว(GAMLV) เท่ากับ 0.072 และ 0.21 N/m
 ดังนั้น แรงที่กำหนดให้ขอบที่ 1-4 คือ $WETT = (-GAMLV * \cos(ANGLE * \pi / 180))$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นพิจารณาเลือกใส่แรงลงในแนวแกนใดแกนหนึ่งใน 3 แกน(e1-e3) โดยที่ e1-e3 ก็คือแกน x-z นั่นเอง โดยมีเงื่อนไขการทำงานของโปรแกรมว่า แรงที่กระทำที่หน้าของพื้นผิวนั้นๆ ต้องทำให้เกิดแรงลัพธ์ที่ตั้งฉากและมีทิศพุ่งออกจากหน้านั้นๆ ด้วย ซึ่งสามารถพิจารณาได้โดยการใช้ตัวดำเนินการ curl ทางคณิตศาสตร์ โดยที่ $\text{curl}\vec{w} = WETT\vec{k}$ และจากกฎมือขวาจะได้ $\vec{w} = -WETT*y\hat{i}$ หรือ $\vec{w} = WETT*x\hat{j}$ ดังนั้นจึงสามารถเลือกใส่แรงลงในแนวแกนได้ 2 แบบดังนี้

แบบที่ 1 energy:
e1: $-WETT*y$
e2: 0
e3: 0

หรือ แบบที่ 2 energy:
e1: 0
e2: $WETT*x$
e3: 0

รายละเอียด text file ของโปรแกรม(mound.fe) แสดงในไว้ภาคผนวก

3. แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณีดังนี้

- *มุมเป็ยก* กำหนดให้ค่ามุมเป็ยกระหว่างหดยของเหลวและพื้นผิวเท่ากับ 45° , 90° และ 135° โดยที่แรงตึงผิว และปริมาตรหดยของเหลวคงที่

- *แรงตึงผิว* กำหนดให้แรงตึงผิวของของเหลวเท่ากับ 0.072 และ 0.21 N/m

ในขณะที่มุมเป็ยกและปริมาตรคงที่

- *ปริมาตร* กำหนดให้ปริมาตรหดยของเหลวมีค่าเท่ากับ 1 และ 2 หน่วยของ


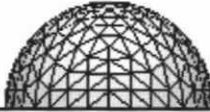
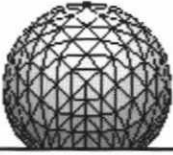
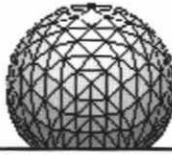




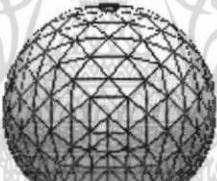

โปรแกรม ในขณะที่มุมเป็ยก และแรงตึงผิวมีค่าคงที่

3.1.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ผลการทดลองการศึกษาลักษณะหดยของเหลวบนพื้นผิวตามเงื่อนไขการทดลอง

กรณีศึกษา	แรงตึงผิว(N/m)	
	0.072	0.21
- ปริมาตรหดยของเหลว 1 หน่วย		
มุมเป็ยก = 45°		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมเป็ยก = 90°		
มุมเป็ยก = 135°		
- ปริมาตรหยดของเหลว 2 หน่วย		
มุมเป็ยก = 45°		
มุมเป็ยก = 90°		
มุมเป็ยก = 135°		

สำหรับเงื่อนไขที่แตกต่างกันให้ผลการทดลองมีลักษณะต่างๆ โดยที่ แรงตึงผิวของของเหลว มีผลกระทบน้อยมากต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงหยดของเหลวบนพื้นผิวดังจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง 2 รูปในแถวเดียวกันไม่แตกต่างกัน ซึ่งตรงกันข้ามกับผลการทดลองในกรณีของค่ามุมเป็ยก และปริมาตรที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยค่ามุมเป็ยกที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถของหยดของเหลวที่เกาะอยู่บนพื้นผิวมีค่าลดลง ในขณะที่ความสูงเพิ่มขึ้น ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจะเป็นเพียงการเพิ่มขนาดของหยดของเหลวโดยไม่ทำให้ลักษณะหยดบนพื้นผิวต่างไปจากเดิม

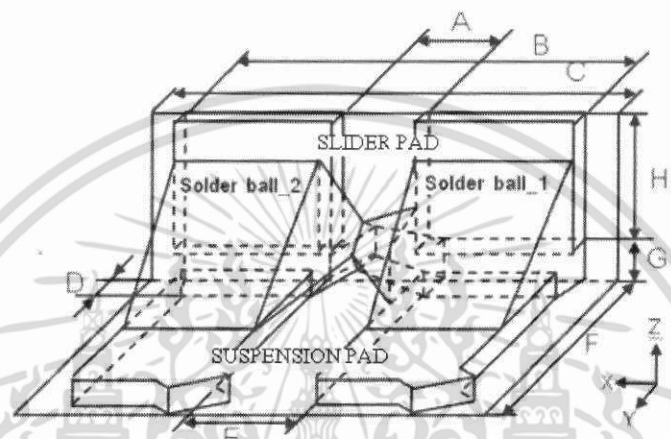
เนื่องจากในการทดลองนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นเพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขและผลที่ได้ ซึ่งอาจจะยังเห็นผลกระทบจากตัวแปรดังกล่าวไม่ชัดเจน ดังนั้นในการทดลองถัดไปจะได้ยกตัวอย่างถึงผลกระทบจากค่าของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการเกิดโซเดอริบรีดจ์ระหว่างสไลเดอร์และซีสเป็นชั้นของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

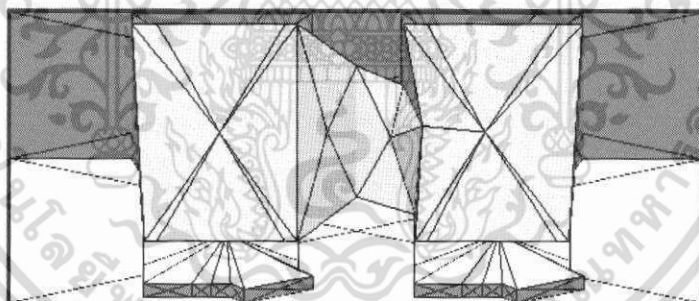
3.2 ศึกษาลักษณะการเกิดโซลเดอร์บริดจ์ระหว่างสไลเดอร์และซัสเพนชันที่วางทำมุมกัน 90°

3.2.1 วิธีการทดลอง

1. สร้างโมเดลเริ่มต้นสำหรับการศึกษาลักษณะการเกิดโซลเดอร์บริดจ์ระหว่างสไลเดอร์และซัสเพนชันของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ แสดงดังรูป 3.2 และภาพด้านข้างในรูป 3.3 รายละเอียดการเขียน source code ใน script file แสดงไว้ในภาคผนวก

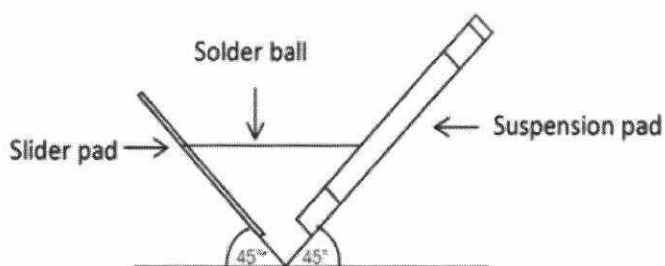


(a) แบบทางโครงสร้างของโมเดลเริ่มต้น(ขนาดอ้างอิงได้จากรายงานภายใน western digital: WD)



(b) โมเดลเริ่มต้นที่ใช้โปรแกรม

รูปที่ 3.2 โครงสร้างโมเดลเริ่มต้นสำหรับการใช้วิเคราะห์ลักษณะการเกิดโซลเดอร์บริดจ์

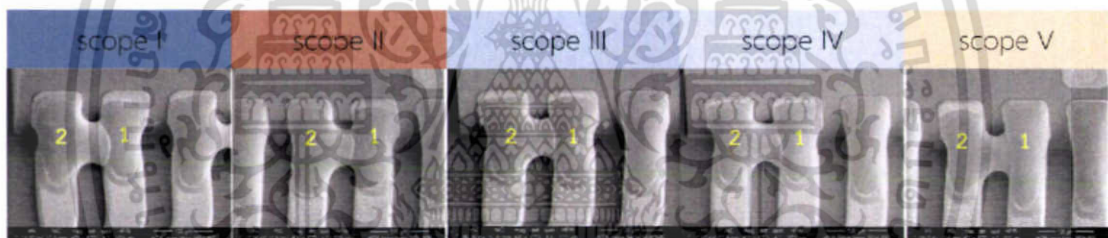


รูปที่ 3.3 ภาพด้านข้างของรูปที่ 3.2 (โดยหมุนภาพทวนเข็มนาฬิกา 45°)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเชื่อมตาระหว่างคู่ของสไลเดอร์และซัสเพนชันของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์จะทำที่ละคู่ตั้งนั้นจึงกำหนดให้โซลเดอร์บอลลูกที่ 1 (ทางขวา)หลอมเหลวและแข็งตัวไปก่อนโซลเดอร์บอลลูกที่ 2 (ทางซ้าย) สาเหตุที่จะต้องสร้างโซลเดอร์บอลทั้งสองลูกให้ติดกันตั้งแต่เริ่มต้นนั้นเป็นเพราะว่าโซลเดอร์บอลลูกหลอมเหลวด้วยอุณหภูมิค่าหนึ่งซึ่งลักษณะการไหลของตะกั่วไปบนพื้นผิวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย แต่ทว่าโปรแกรม surface evolver ไม่สามารถวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของโซลเดอร์บอลที่สร้างด้วยแรงที่กำหนดให้เพียงอย่างเดียวนั้นจึงยังไม่เพียงพอที่จะใช้สำหรับศึกษาการเกิดโซลเดอร์บริดจ์ได้ จึงเป็นเหตุผลว่าทำไมจึงจำเป็นต้องสร้างให้โซลเดอร์บอลทั้งสองลูกติดกันตั้งแต่เริ่ม

2. กำหนดเงื่อนไขการทดลองโดยที่โซลเดอร์บอลลูกที่ 1 จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรใดทั้งสิ้น เนื่องจากกำหนดให้หลอมเหลวและแข็งตัวไปก่อนโซลเดอร์บอลลูกที่ 2 ในขณะที่โซลเดอร์บอลลูกที่ 2 กำหนดให้หลอมเหลวและแข็งตัวภายหลัง ดังรูป 3.4 ที่แสดงให้เห็นว่ากรณีที่เกิดโซลเดอร์บริดจ์จากทั้ง 5 ภาพ โซลเดอร์บอลทางด้านขวาจะหลอมเหลวและแข็งตัวไปก่อนที่โซลเดอร์บอลทางด้านซ้ายจะเกิดโซลเดอร์บริดจ์ไปแปะติดภายหลัง ด้วยสาเหตุที่มาจากค่าของมุมเปียกบนสไลเดอร์และซัสเพนชันคู่นั้นไม่เหมาะสม



รูปที่ 3.4 ภาพการเกิดโซลเดอร์บริดจ์ที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโซลเดอร์บอลทางด้านขวา(1) หลอมเหลวและแข็งตัวก่อนที่โซลเดอร์บอลซ้าย(2) จะหลอมเหลวแล้วเกิดโซลเดอร์บริดจ์ภายหลัง

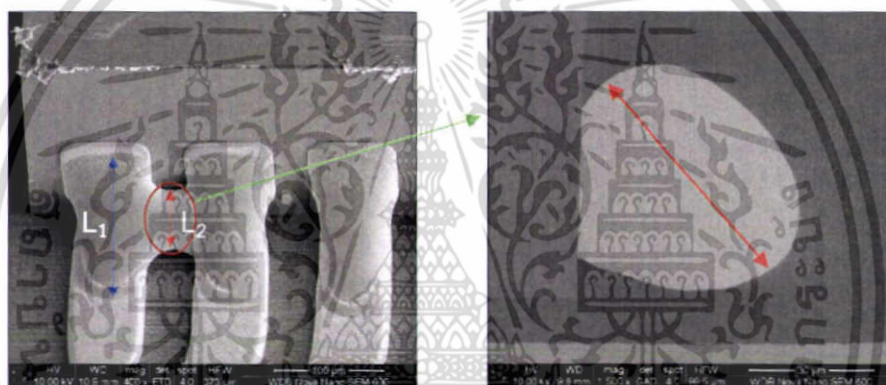
ดังนั้นจึงแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณี พร้อมทั้งหาค่าปริมาตรตะกั่วของบอลลูกที่สองซึ่งทำให้เกิดโซลเดอร์ บริดจ์ที่ค่ามุมเปียกนั้นๆ ด้วย ดังนี้

- เปลี่ยนแปลงค่า wetting angle(0-90°) ระหว่าง solder ball 2 และ สไลเดอร์ (wetting angle ของซัสเพนชันคงที่ 20°)
- เปลี่ยนแปลงค่า wetting angle(0-90°) ระหว่าง solder ball 2 และ ซัสเพนชัน (wetting angle ของสไลเดอร์คงที่ 15°)
- เปลี่ยนแปลงค่า wetting angle (0-90°) ระหว่าง solder ball 2 กับ สไลเดอร์ และซัสเพนชัน

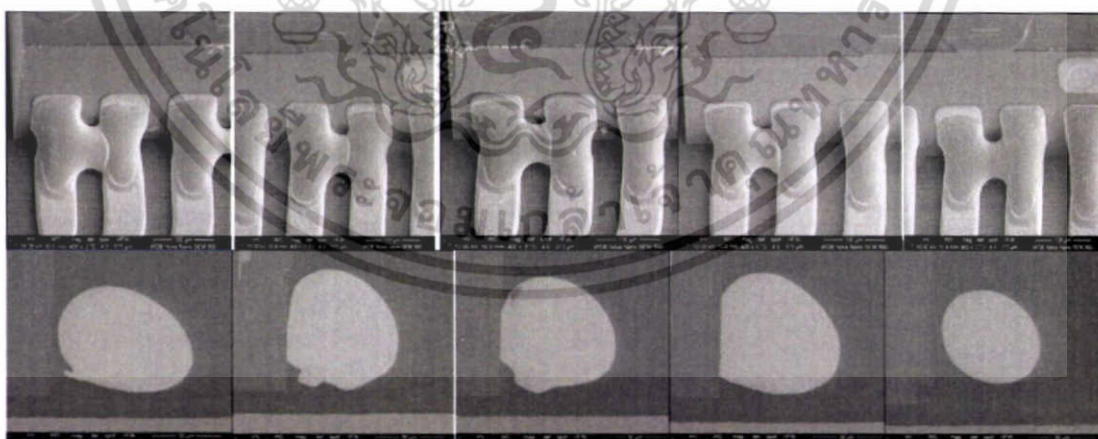
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หมายเหตุ
- ค่ามุมเปียกที่เปลี่ยนแปลง $0-90^\circ$ มีค่าดังนี้ 5, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90°
 - การจำลองการทำงานแต่ละกรณีให้ทดลองที่ค่า surface tension ดังนี้ คือ 0.25, 0.45 และ 0.65 N/m

3. หาเงื่อนไขที่เกิดโซลเดอ์บริดจ์ เนื่องจากกำหนดให้โซลเดอ์บอลทั้งสองลูกติดกัน ตั้งแต่เริ่มต้น ดังนั้นรูปจากผลการทดลองทุกรูปโซลเดอ์บอลทั้งสองลูกจะเชื่อมติดกัน แต่การนิยามลักษณะที่เรียกว่า เกิดโซลเดอ์บริดจ์นั้นจะพิจารณาจากข้อมูลที่ได้จากการเกิดโซลเดอ์บริดจ์จริง โดยนำผลจากการเปลี่ยนแปลงที่ว่าเมื่อเกิดโซลเดอ์บริดจ์ระหว่างคู่ของสไลเดอร์และซีสเปนชั้นที่อยู่ติดกันผลที่เกิดขึ้นตามมาคือ ปริมาตรตะกั่วที่อยู่บนแพตทั้งสองซึ่งแสดงด้วยระยะ L_1 และที่ไหลออกมาด้านข้างแพต L_2 มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดดังรูป 3.5 ดังนั้นจึงนำจุดนี้มาเป็นหลักในการนิยามหากรณีที่เรียกว่า “เกิดโซลเดอ์บริดจ์” โดยหาอัตราส่วนดังกล่าวจากภาพตัวอย่างกรณีที่เกิดโซลเดอ์บริดจ์ทั้ง 5 ภาพ ที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องไมโครสโคปดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดโซลเดอ์บริดจ์



รูปที่ 3.6 ภาพการเกิดโซลเดอ์บริดจ์สำหรับการหาอัตราส่วน $L_1:L_2$

อัตราส่วนระหว่าง $L_1:L_2$ ของทั้ง 5 รูป มีค่าเฉลี่ย = 0.382 และ $SD = 0.036$ ดังนั้นจึงกำหนดให้ กรณีที่นิยามว่าเกิดโซลเดอ์บริดจ์มีค่าอัตราส่วนดังกล่าวตกอยู่ในช่วง 1σ (sigma) คือ 0.346 – 0.418

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เปรียบเทียบความถูกต้องเพื่อแสดงถึงความสอดคล้องระหว่างโมเดลที่ใช้ศึกษาการเกิดโซลเดอ์บริดจ์นี้กับการเกิดโซลเดอ์บริดจ์จริงว่ามีมากหรือน้อยเพียง โดยการหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับกันของภาพตัดขวางบริเวณ AA ดังรูป 3.7(a) ระหว่างภาพที่ได้จากโปรแกรม แสดงในรูปที่ 3.7(b) และภาพการเกิดโซลเดอ์บริดจ์จริงที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคปทั้ง 5 ภาพ ดังรูป 3.7(c) ด้วยระยะ D_1 และ D_2 จากมุมตั้งแต่ $1-360^\circ$ ดังสมการ(3.1)

$$\%error = \frac{\sum_{i=1}^{360} (D_{2i} - D_{1i})^2}{\sum_{i=1}^{360} (D_{2i})^2} \times 100 \quad (3.1)$$

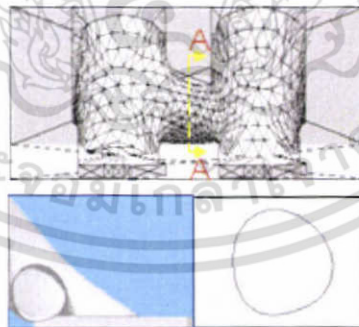
เมื่อ i = มุมที่อ้างอิงเพื่อใช้หาค่า D

D_1 = ระยะจากจุดศูนย์กลางจนถึงขอบภาพที่ได้จากโปรแกรม

D_2 = ระยะจากจุดศูนย์กลางจนถึงขอบภาพที่ได้จากกล้องไมโครสโคป



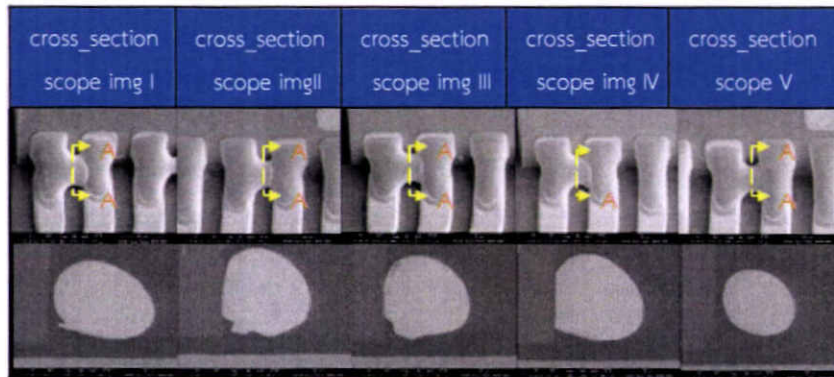
(a) เปรียบเทียบความแตกต่างของภาพตัดขวางระหว่างภาพที่ได้จากโปรแกรม(cross_program img) และแต่ละภาพที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป(cross_scope img) ที่มุม $0-360^\circ$



(b) แสดงภาพตัดขวางตำแหน่ง AA ที่ได้จากโปรแกรม surface evolver(cross_program img.)

รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบความแตกต่างของภาพตัดขวางบริเวณที่เกิดโซลเดอ์บริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

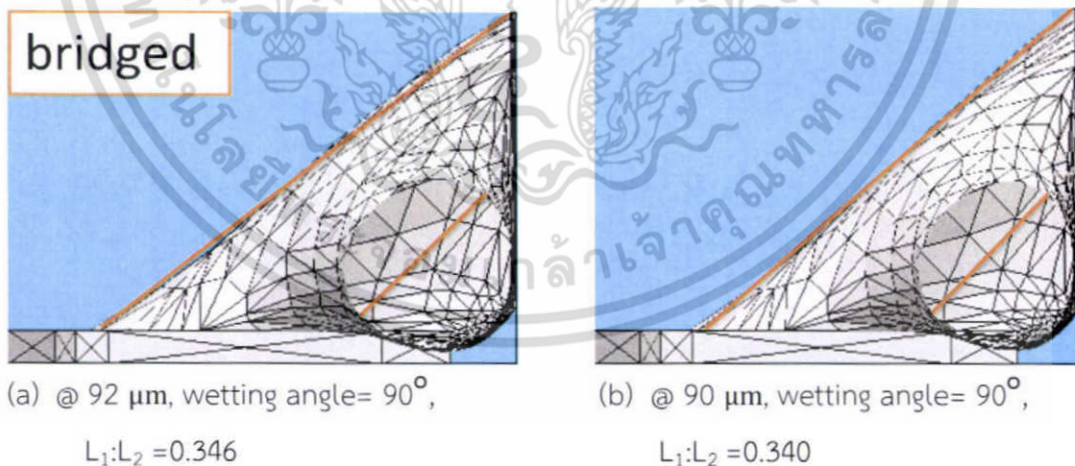


(c) แสดงภาพตัดขวางตำแหน่ง AA ที่ได้จากกล้องไมโครสโคป(cross_scope img.) จำนวน 5 ภาพ รูปที่ 3.7(ต่อ) การเปรียบเทียบความแตกต่างของภาพตัดขวางบริเวณที่เกิดโซลเดอ์บริดจ์

3.2.2 ผลการทดลอง

3.2.2.1 ตัวอย่างผลการจำลองกรณีที่เกิดโซลเดอ์บริดจ์

จากรูปแสดงการหาค่าปริมาตรตะกั่ววิกฤตที่ทำให้เกิดโซลเดอ์บริดจ์ กรณีเปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกทั้งบนสไลเดอร์ และซัสเพนชันแพตพร้อมกันที่มุมเปียก(wetting angle)เท่ากับ 90° พบว่า ปริมาตรวิกฤตมีค่าเทียบเท่ากับที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตะกั่วบอล $92 \mu\text{m}$ เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวตกอยู่ในช่วงที่นิยาม ดังรูปที่ 3.8(a) แต่ในรูป 3.8(b) ค่าอัตราส่วนไม่อยู่ในช่วงที่นิยามจึงไม่เกิดโซลเดอ์บริดจ์

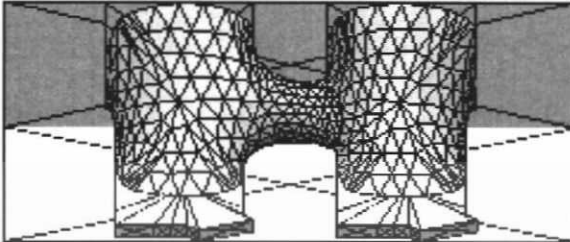
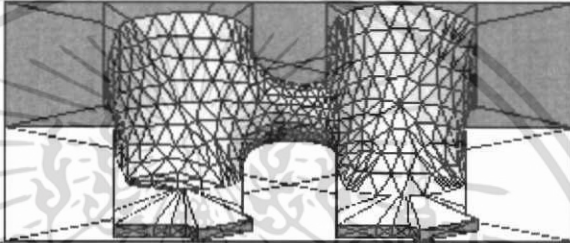
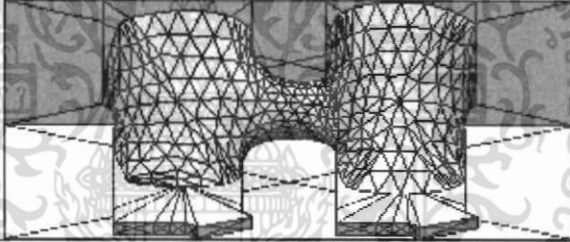
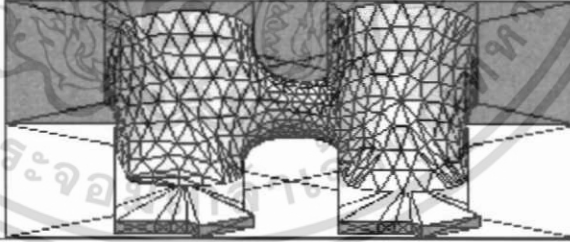
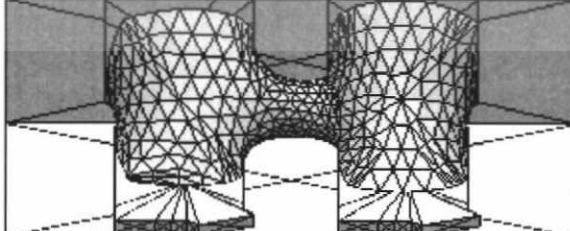


รูปที่ 3.8 การหาค่าอัตราส่วนเพื่อหากรณีที่เกิดโซลเดอ์บริดจ์

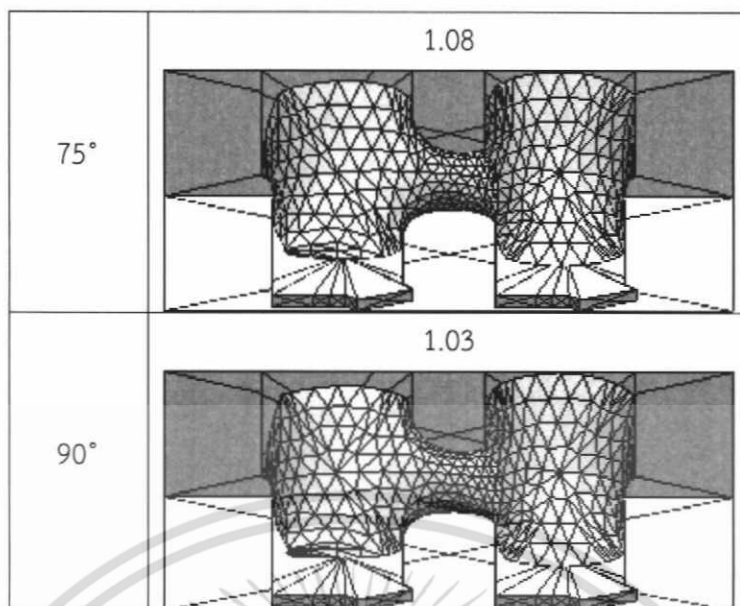
3.2.2.2 ผลการจำลองการเกิดโซลเดอ์บริดจ์ด้วยโปรแกรมภายใต้เงื่อนไขการทดลอง

ตารางที่ 3.2 ผลการจำลองค่าปริมาตรตะกั่วที่ทำให้เกิดโซลเดอ์บริดจ์ที่มุมเปียกค่าต่างๆ ในกรณีเปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนสไลเดอร์ และซัสเพนชันที่ surface tension = 0.45 N/m

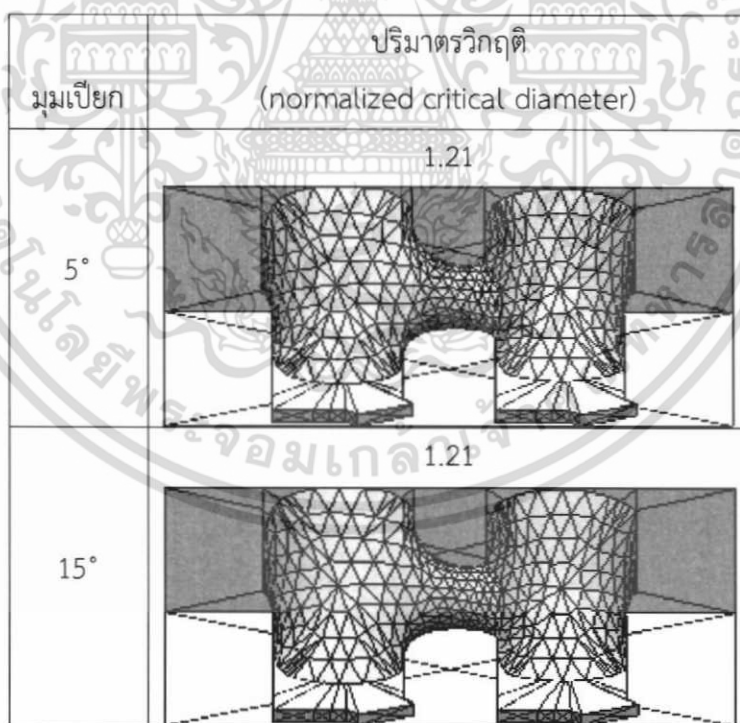
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมเป็ยก	ปริมาตรวิกฤติ (normalized critical diameter)
5°	<p style="text-align: center;">1.17</p> 
15°	<p style="text-align: center;">1.17</p> 
30°	<p style="text-align: center;">1.16</p> 
45°	<p style="text-align: center;">1.15</p> 
60°	<p style="text-align: center;">1.12</p> 

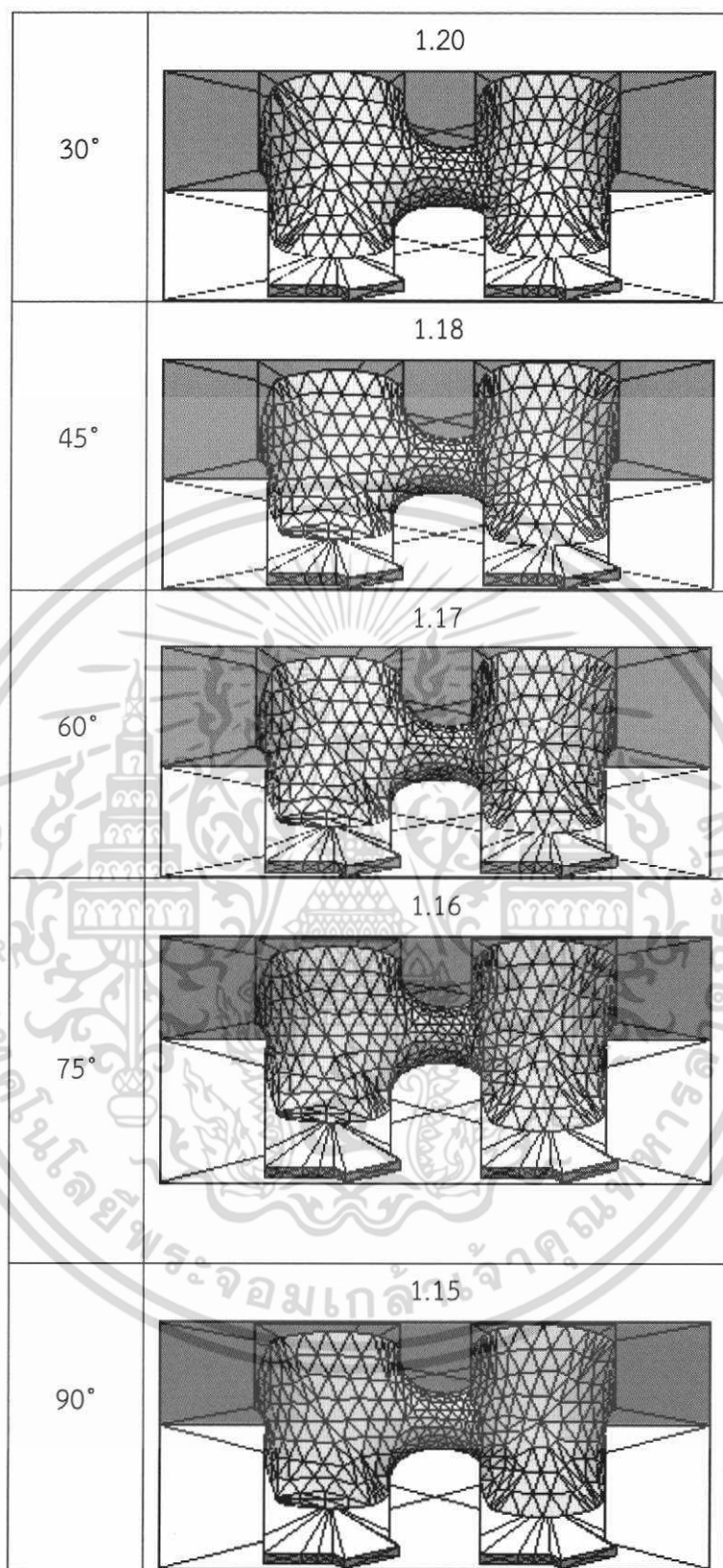
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 3.3 ผลการจำลองค่าปริมาตรตะกั่วที่ทำให้เกิดไซลเดอร์บริดจ์ที่มุมเปียกค่าต่างๆ ในกรณีที่เปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนสไลเดอร์ ที่ surface tension = 0.45 N/m

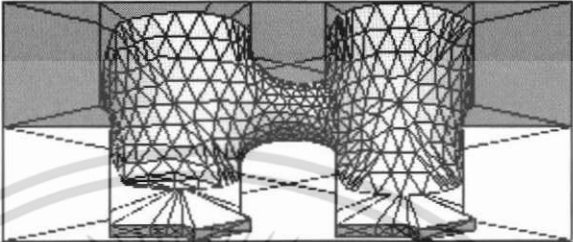
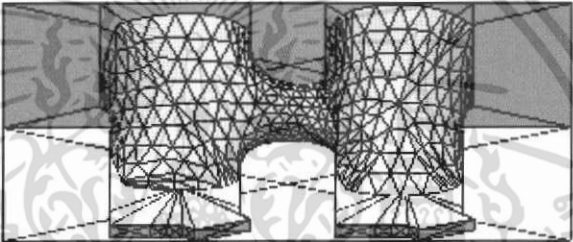
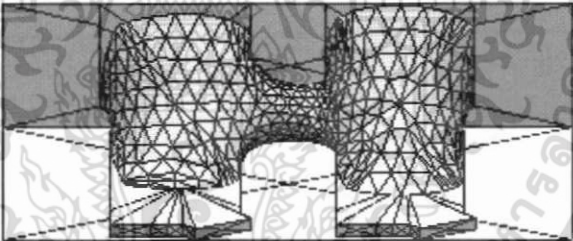
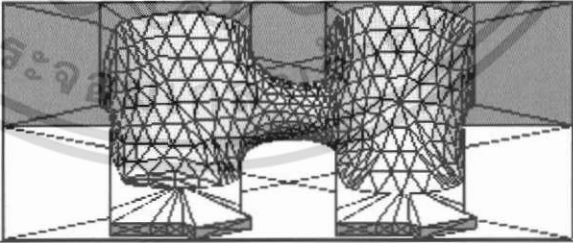
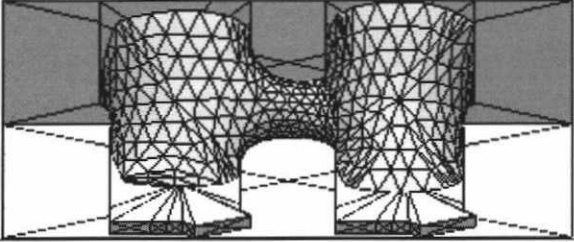


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

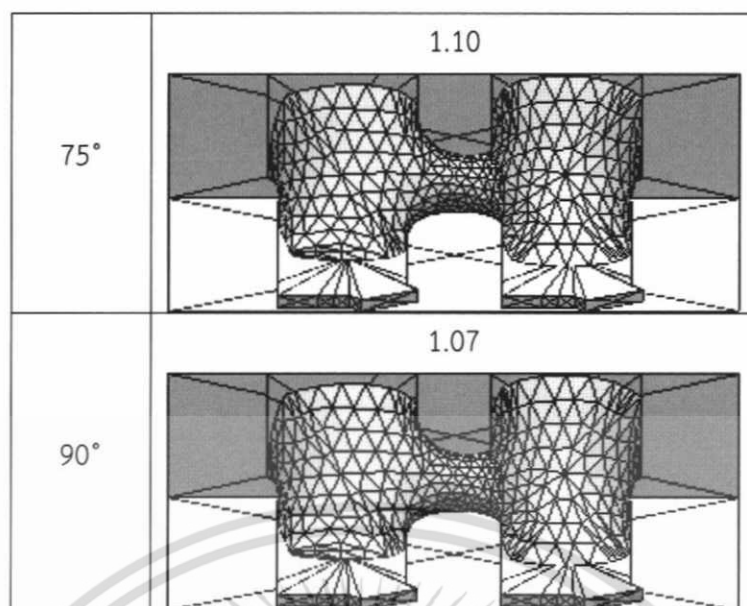


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ผลการทดลองค่าปริมาตรตะกั่วที่ทำให้เกิดโซลเดอร์บริดจ์ที่มุมเปียกค่าต่างๆ ในกรณีที่เปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนซัสเพนชันที่ surface tension = 0.45 N/m

มุมเปียก	ปริมาตรวิกฤติ (normalized critical diameter)
5°	1.18 
15°	1.17 
30°	1.16 
45°	1.15 
60°	1.13 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



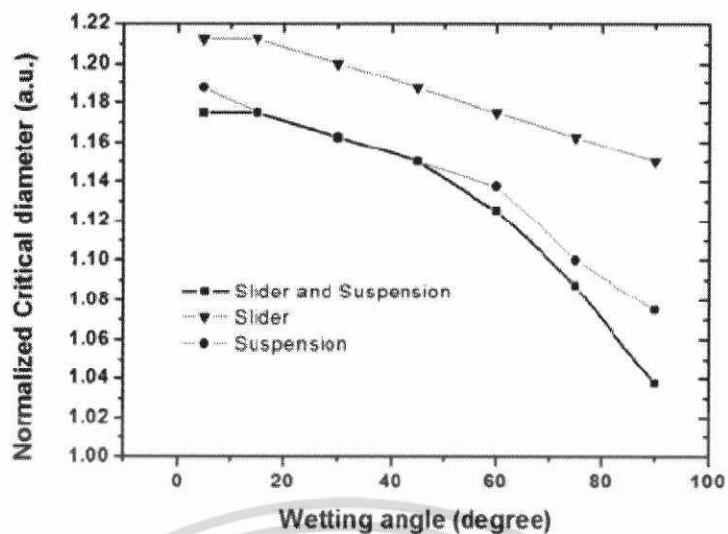
จากผลการจำลองเปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียก(wetting angle) บนแพตต่างๆ ที่ surface tension 0.45 N/m พบว่ากรณีเปลี่ยนแปลงค่ามุมทั้งบนสไลเดอร์ และซัสเพนชันแพตพร้อมกัน ปริมาตรตะกั่วที่อยู่บนแพตลดลง กลับไหลมาด้านข้างแพตมากขึ้น ในกรณีเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฉพาะบนสไลเดอร์ หรือซัสเพนชันอย่างใดอย่างหนึ่ง เฉพาะปริมาตรตะกั่วที่อยู่บนแพตที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเท่านั้นที่ลดลง และจะสังเกตเห็นว่าทั้ง 3 กรณีปริมาตรตะกั่ววิกฤตที่ทำให้เกิดโซลเดอร์บริดจ์มีค่าลดลงเมื่อค่ามุมเปียกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะ มุมเปียกที่มีค่ามากเปรียบเสมือนกับพื้นผิวที่ไม่มีความเหมาะสมให้ตะกั่วสามารถไหลอยู่บนพื้นผิวได้ ดังนั้นตะกั่วส่วนใหญ่จึงไหลออกทางด้านข้างแพตได้ง่าย ฉะนั้นแม้ปริมาตรตะกั่วเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดโซลเดอร์บริดจ์ได้แล้ว สำหรับปริมาตรตะกั่ววิกฤตที่ทำให้เกิดโซลเดอร์บริดจ์แต่ละกรณีแสดงเปรียบเทียบกันด้วยกราฟดังรูป 3.9 -3.11 ที่ค่า surface tension เท่ากับ 0.45, 0.25 และ 0.65 N/m ตามลำดับ

หมายเหตุ เนื่องจากรูปผลการจำลองที่ได้จากกรณี surface tension เท่ากับ 0.25 และ 0.65 N/m ไม่ต่างไปจากกรณี surface tension 0.45 N/m ดังนั้นจึงไม่นำเสนอไว้ในผลการทดลอง แต่จะนำเสนอด้วยกราฟดังต่อไปนี้

3.2.2.3 เปรียบเทียบผลการทดลองทั้ง 3 กรณีในรูปแบบของกราฟ

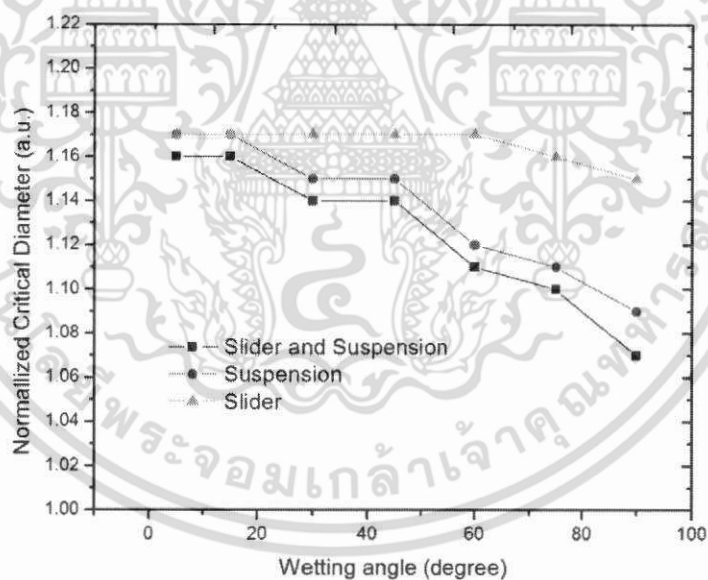
- กราฟผลการทดลองแสดงค่าปริมาตรวิกฤตของหยดตะกั่ว โดยเสนอด้วยค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดตะกั่ว (surface tension = 0.45 N/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเปียกและปริมาตรวิกฤต
surface tension = 0.45 N/m

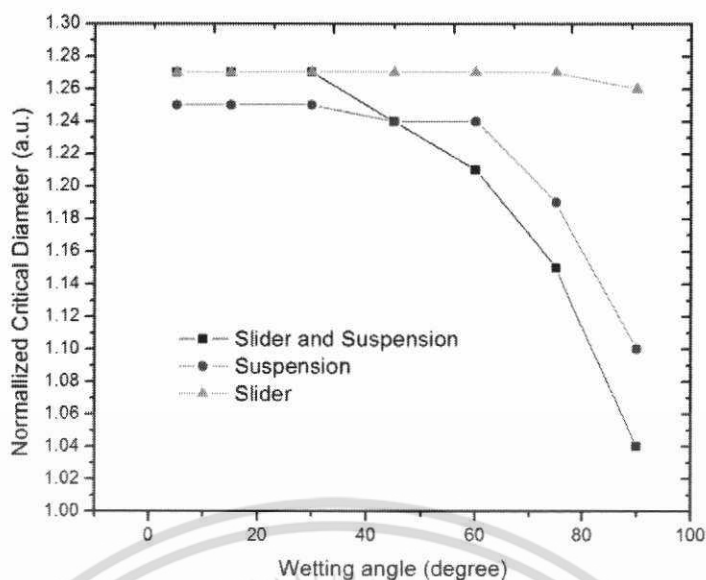
- กราฟผลการทดลองแสดงค่าปริมาตรวิกฤตของหยดตะกั่ว โดยเสนอด้วยค่าเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของหยดตะกั่ว (surface tension = 0.25 N/m)



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเปียกและปริมาตรวิกฤต
surface tension = 0.25 N/m

- กราฟผลการทดลองแสดงค่าปริมาตรวิกฤตของหยดตะกั่ว โดยเสนอด้วยค่าเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของหยดตะกั่ว (surface tension = 0.65 N/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเปียกและปริมาตรวิกฤต
surface tension = 0.65 N/m

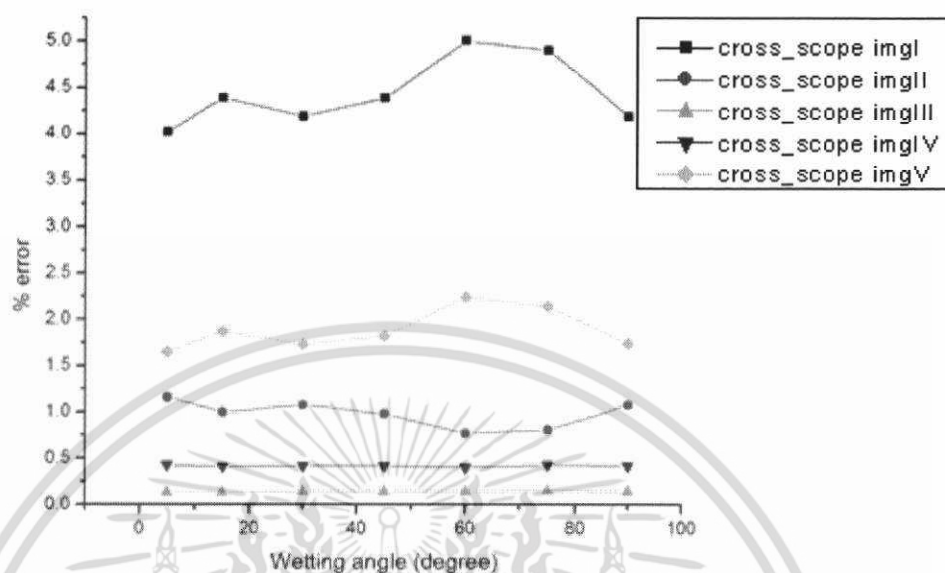
จากผลการทดลองในรูปที่ 3.6 – 3.8 แสดงให้เห็นว่ากราฟทั้ง 3 เส้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่ามุมเปียกเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนสไลเดอร์และซิสเพนชัน และการเปลี่ยนแปลงเฉพาะบนซิสเพนชัน เส้นกราฟมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนด้วยค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าค่ามุมเปียกมีผลอย่างมากต่อการเกิดโซเดอริบริดจ์ ซึ่งต่างจากกราฟของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกเฉพาะบนสไลเดอร์ ทั้งนี้เป็นเพราะ ความกว้างทางโครงสร้างของสไลเดอร์มากกว่าซิสเพนชัน ซึ่งทำให้ตะกั่วสามารถไหลไปบนพื้นผิวได้มากก่อนที่จะไหลออกมาด้านข้างจนทำให้เกิดโซเดอริบริดจ์ระหว่างคู่ PAD ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนสไลเดอร์จึงมีผลกระทบน้อยกว่า

พื้นผิวใดๆ ที่มีค่ามุมเปียกระหว่างหยดของเหลวกับพื้นผิวมากเปรียบเสมือนกับพื้นผิวนั้นมีลักษณะลื่น ความสามารถในการเกาะพื้นผิวของหยดของเหลวจะลดลง(ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองตอนที่แล้ว) จึงเป็นเหตุผลให้ปริมาตรตะกั่วไหลออกทางด้านข้างได้ง่ายแม้ว่าปริมาตรจะลดลง ปริมาตรที่ทำให้เกิดโซเดอริบริดจ์นี้เรียกว่า “ปริมาตรวิกฤต(critical volume)” ดังนั้นเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดโซเดอริบริดจ์ปริมาตรของตะกั่วควรจะน้อยกว่าปริมาตรวิกฤต

ผลจากแรงตึงผิวของตะกั่ว(surface tension) ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าปริมาตรวิกฤตเพิ่มขึ้นด้วย เพราะ ความสามารถการเกาะพื้นผิว(wetting) ของตะกั่วเพิ่มขึ้นจึงทำให้ปริมาตรของตะกั่วสามารถไหลอยู่บนพื้นผิวได้ดี ดังนั้นจึงต้องใช้ปริมาตรเพิ่มขึ้นสำหรับเกิดโซเดอริบริดจ์

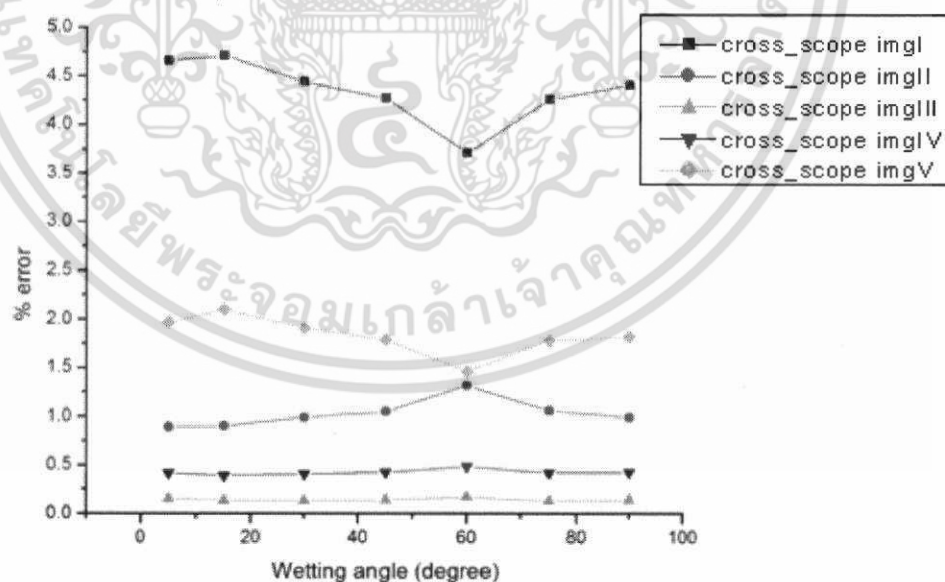
3.2.2.4 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างการเกิดไฮดรอกไซด์ระหว่างโมเดลและภาพถ่ายจาก SEM

- กรณีเปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนสไลด์เตอร์และซีสเปนชั้น



รูปที่ 3.12 กราฟแสดง %error ระหว่างภาพจากโปรแกรม(cross_program img) และภาพที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป(cross_scope img) จำนวน 5 ภาพ กรณีที่เปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนสไลด์เตอร์และซีสเปนชั้น

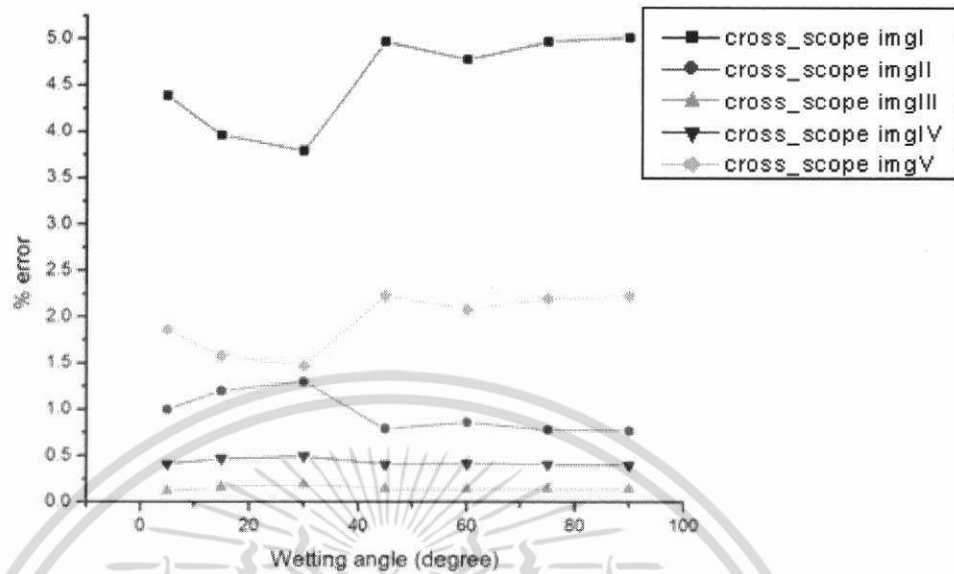
- กรณีเปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนสไลด์เตอร์



รูปที่ 3.13 กราฟแสดง %error ระหว่างภาพจากโปรแกรม(cross_program img) และภาพที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป(cross_scope img) จำนวน 5 ภาพ กรณีที่เปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนสไลด์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรณีเปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนซัสเพนชัน



รูปที่ 3.14 กราฟแสดง %error ระหว่างภาพจากโปรแกรม(cross_program img) และภาพที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป(cross_scope img) จำนวน 5 ภาพ กรณีที่เปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนซัสเพนชัน

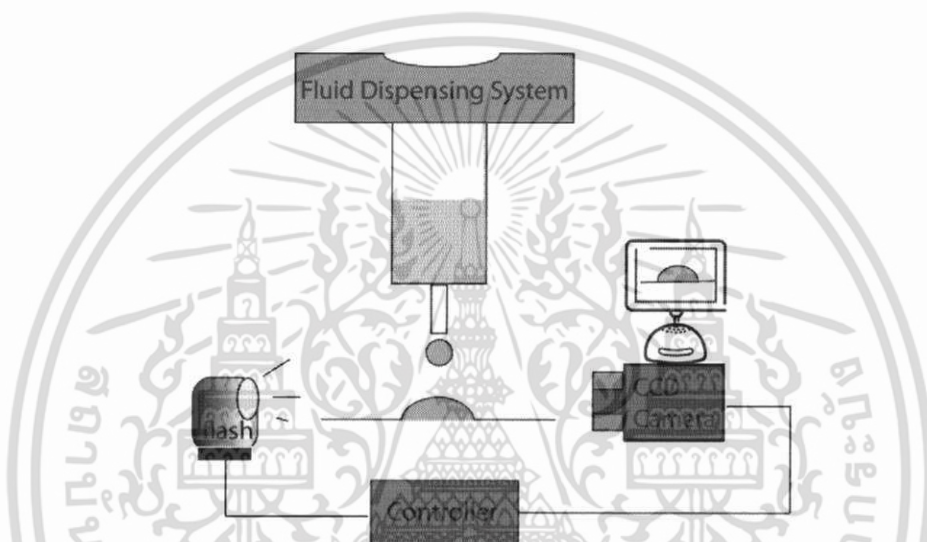
จากกราฟแสดงความคลาดเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนแพตต่างๆ ทั้ง 3 กรณีนั้นพบว่าเส้นกราฟที่แสดงความคลาดเคลื่อนของภาพที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคปภาพที่ 1 (cross_scope img I) มีค่ามากที่สุด และต่างไปจากกลุ่มด้วย(ภาพตัดขวางที่ 2-5: cross_scope img II - V) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ใช้มีความเหมาะสมสำหรับการพิจารณากรณีที่เกิดโซลเดอ์บริดจ์ในลักษณะที่คล้ายภาพ cross_scope img II - V แต่ไม่เหมาะสมสำหรับการพิจารณาการเกิดโซลเดอ์บริดจ์ที่มีลักษณะภาพของ cross_scope img I ดังนั้น การเกิดโซลเดอ์บริดจ์ที่มีลักษณะคล้ายกับภาพ cross_scope img I นั้นอาจจำเป็นต้องสร้างโมเดลเริ่มต้นที่ใช้ในโปรแกรมขึ้นมาใหม่เพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับกรณีนี้โดยเฉพาะ

บทที่ 4

การศึกษา และวัดพฤติกรรมเชิงพลวัตของของเหลว โดยใช้ระบบแฟลชโฟโตกราฟี

4.1 การออกแบบการทดลอง

ระบบแฟลชโฟโตกราฟีมีการจัดอุปกรณ์ ดังรูป 4.1 โดยระบบในรูปต้องจัดอุปกรณ์ในห้องมืด ซึ่งทำได้จากการสร้างห้องจำลองขนาดเล็กโดยเฉพาะสำหรับระบบนี้

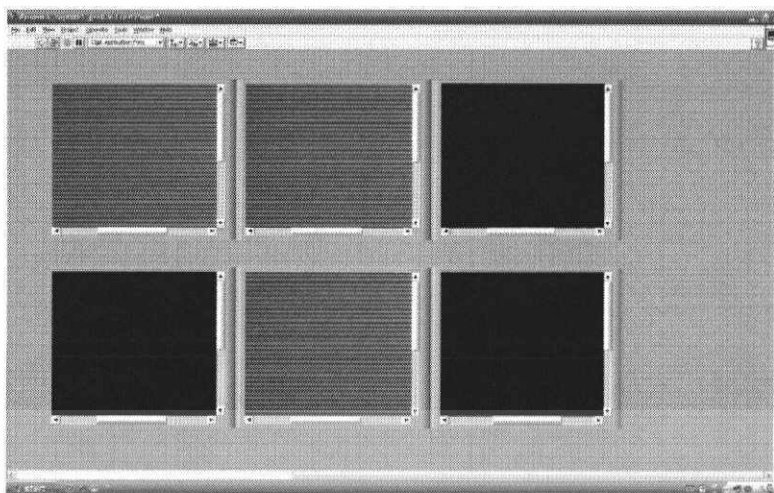


รูปที่ 4.1 ระบบการถ่ายภาพหยดของเหลวด้วยเทคนิคแฟลชโฟโตกราฟี

การทำงานของระบบแบ่งตามหน้าที่ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

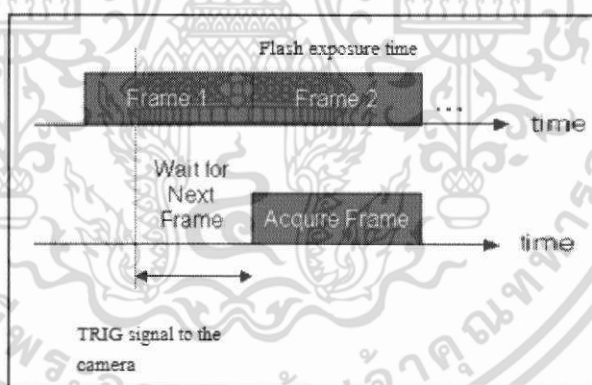
1. ระบบการถ่ายภาพ ประกอบด้วยแฟลชภายนอก กล้อง CCD microscope และการ์ดถ่ายภาพของบริษัท National Instrument (NI PCI-1411) โดยสัญญาณวิดีโอจากกล้อง CCD microscope ต่อเข้ากับการ์ดถ่ายภาพอยู่ตลอดเวลาเมื่อได้รับสัญญาณทริกส์จากไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วจึงหวนการถ่ายภาพของการ์ดถ่ายภาพและแสงแฟลชจะทำงานเข้าจังหวะกันได้พอดี

เนื่องจากระบบแฟลชโฟโตกราฟีที่ออกแบบในการทดลองนี้ใช้กล้องไมโครสโคปแบบเลนส์เดี่ยวซึ่งต่ออยู่กับการ์ดถ่ายภาพทำงานร่วมกับแฟลชถ่ายภาพจากภายนอก (external flash) จึงต้องออกแบบช่วงจังหวะทำงานของการ์ดถ่ายภาพและแสงแฟลชให้สอดคล้องกัน ถ้าไม่เช่นนั้นผลที่ได้จะเป็นดังรูป 4.2 ความไม่แน่นอนในการถ่ายภาพเกิดขึ้นโดยถ้าอุปกรณ์ทำงานสอดคล้องกันจะสามารถถ่ายภาพได้ (ภาพสว่าง) แต่ถ้าไม่ (ภาพมืด) จึงทำให้ไม่สามารถเก็บรายละเอียดในภาพได้



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากโปรแกรม Labview ที่เกิดจากการถ่ายภาพและแสงแฟลชทำงานยังไม่
สอดคล้องกัน

ที่เป็นเช่นนี้ สาเหตุเกิดจากการถ่ายภาพ(รุ่น NI PCI-1411) ของบริษัท National instrument ซึ่งเป็น frame grabber card ชนิด monochrome มีหลักการถ่ายภาพที่สำคัญคือ เมื่อได้รับสัญญาณทริกส์เพื่อเริ่มการถ่ายภาพ ณ เวลาใดๆ จะเป็นการแจ้งเตือนให้การ์ดเตรียมการถ่ายภาพเฟรมถัดไป นั่นหมายถึงแสงแฟลชจะต้องเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง Frame 2 ดังรูป 4.3



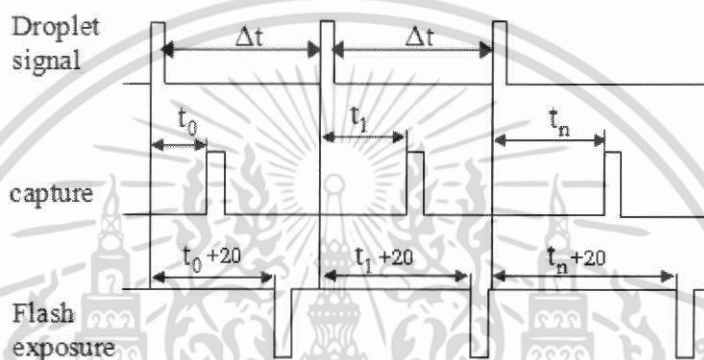
รูปที่ 4.3 หลักการทำงานของการ์ดถ่ายภาพ

หลักการพิจารณาการเกิดภาพมืดหรือสว่างจะต้องพิจารณาว่าสัญญาณทริกส์นั้นเกิดที่ฟิล์มคู่ หรือคู่ของเฟรมที่ถ่ายภาพ ที่ภาพมืดเป็นเพราะสัญญาณทริกส์แสงแฟลชเกิดในตำแหน่งฟิล์มคู่ของเฟรมที่ 1 จึงทำให้ช่วงเวลาที่แสงแฟลชจ้อยู่ที่นั่นไม่ครอบคลุมไปถึงเฟรมที่ 2 (flash exposure time ≈ 20 ms ≈ 1 ฟิล์ม) แต่ที่ในบางครั้งจะเห็นว่าภาพสว่างดังแสดงในรูป นั้นอาจเป็นเพราะ สัญญาณเกิดขึ้นที่ฟิล์มคู่ของเฟรมที่ 1 จึงทำให้แสงแฟลชบางส่วนหรือเกือบทั้งหมดเหลือมเข้าไปที่เฟรม 2 ดังนั้น สิ่งสำคัญคือ ต้องทำการหน่วงเวลาของแสงแฟลชออกไปจากสัญญาณทริกส์การ์ดถ่ายภาพประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

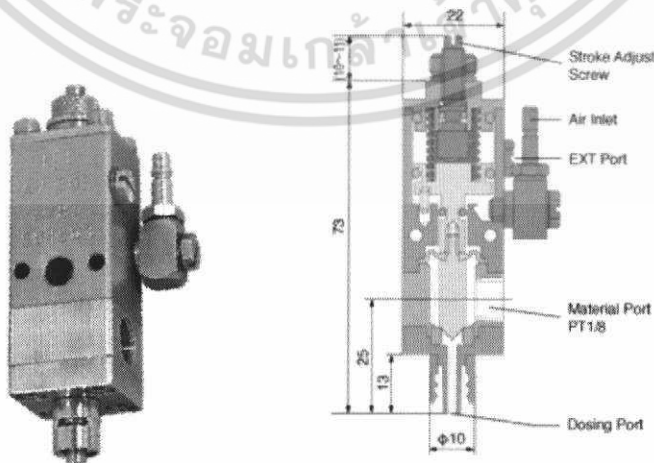
1. พัลส์เพื่อให้แสงแฟลชไปเกิดที่ตำแหน่งเฟรมที่ 2 พอดี ดังนั้นสัญญาณการควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องมีการหน่วงเวลา โดยรายละเอียดแสดงในหัวข้อถัดไป

2. ระบบควบคุมการถ่ายภาพ เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับสัญญาณที่เซนเซอร์ตรวจจับได้ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณพัลส์ออกไป 2 ชุด ชุดแรกใช้เป็นสัญญาณอินพุทของการถ่ายภาพโดยใช้โปรแกรม Labview เพื่อควบคุมการถ่ายภาพ และสัญญาณพัลส์อีกชุดหนึ่งเพื่อให้แฟลชทำงาน ซึ่งพัลส์แต่ละลูกมีช่วงระยะเวลาห่างกันดังแสดงในรูป 4.4 ทั้งนี้ช่วงระยะเวลาห่างของพัลส์ทั้งสองลูกนั้นเป็นช่วงเวลาที่การถ่ายภาพและแสงแฟลชทำงานเข้าจังหวะกันพอดี (synchronize) ตามที่ได้กล่าวไปแล้ว



รูปที่ 4.4 การหน่วงเวลาเพื่อการถ่ายภาพและปล่อยแสงแฟลช

3. ระบบหยดของเหลว ประกอบด้วยปั๊มลม ตัวรักษาแรงดันแรงดันลมให้คงที่ (pressure regulator) เครื่อง pressure dispenser (IEI AD2000C) และกระบอกบรรจุของเหลว สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของหยดน้ำนั้นจะใช้กระบอกสำหรับบรรจุของเหลวดังรูป 4.5 เนื่องจากน้ำเป็นของเหลวประเภท Newtonian fluid ที่มีค่าความหนืดต่ำจึงจำเป็นต้องบรรจุอยู่ในภาชนะที่สามารถรักษาสภาพความเป็นสุญญากาศให้ได้มากที่สุด ไม่เช่นนั้นหยดน้ำจะสามารถไหลออกจากกระบอกหยดได้โดยที่ยังไม่ได้ทำการทดลองเนื่องจากแรงดันอากาศที่ตกค้างอยู่ในสายลม

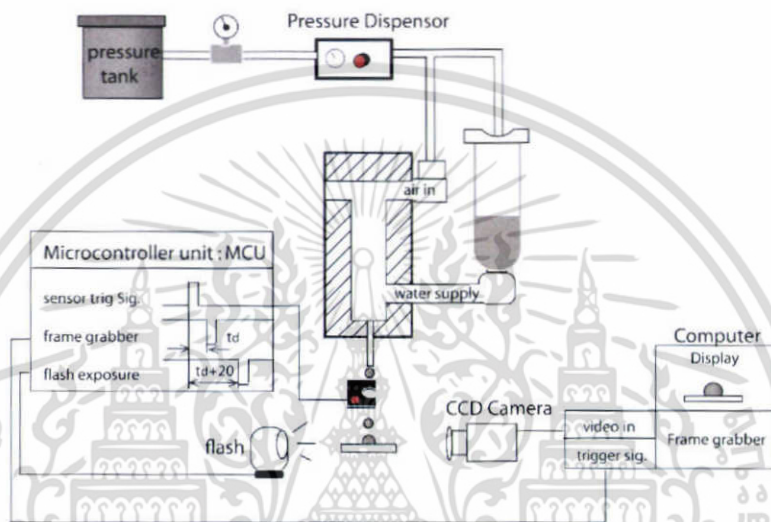


รูปที่ 4.5 valve สำหรับยิงหยดของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 วิธีการทดลอง

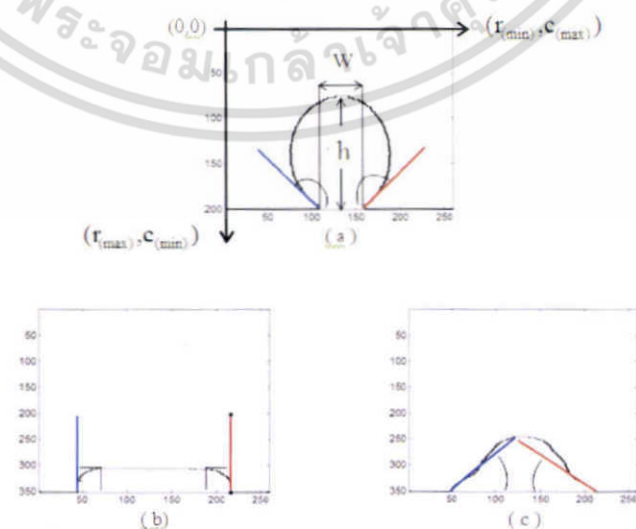
1. จัดอุปกรณ์ทดลองดังรูป 4.6 บรรจุน้ำลงในกระบอก 4 ml กำหนดแรงดันคงที่ 490 kPa หน่วงเวลาการถ่ายภาพตั้งแต่เริ่มต้นที่เซนเซอร์ตรวจพบว่ามีหยดน้ำตัดผ่านจนกระทั่งหยดน้ำเสถียรเป็นหยดอยู่บนพื้นผิว โดยการถ่ายภาพแต่ละครั้งให้มีการหน่วงเวลาเพิ่มขึ้นครั้งละ 250 us (เป็นค่าหน่วงเวลาที่มากเพียงพอสำหรับเก็บรายละเอียดพฤติกรรมของหยดน้ำที่เวลาใดๆ) แต่สำหรับผลการทดลองที่นำมาแสดงนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของผลการทดลองทั้งหมด เนื่องจาก ความถี่การถ่ายภาพมีมากจึงเลือกเฉพาะภาพที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเท่านั้น



รูปที่ 4.6 การจัดอุปกรณ์การทดลองระบบถ่ายภาพเพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของหยดน้ำ

2. วัดค่าความสูง รัศมี และมุมเปียกของหยดน้ำ

การวัดค่าดังกล่าวของหยดน้ำในภาพ ต้องนำภาพไปดำเนินการหาขอบภาพก่อนเพื่อให้เกิดความชัดเจนในตำแหน่งที่จะวัด โดยใช้โปรแกรม ImageJ สำหรับการหาขอบภาพ และคำนวณค่ามุมเปียกด้วยโปรแกรม Matlab ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การวัดค่ามุมเปียกในโปรแกรม Matlab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การหาค่ามุมเบี่ยงแบ่งเงื่อนไขการพิจารณาออกเป็น 3 กรณี โดยแต่ละกรณีแบ่งออกเป็นมุมทางด้านซ้ายและขวาของภาพ ดังนี้

กรณีที่ 1 มุมฉาก ($C_{r(max)} = C_{r(min)}$; $\theta = 90^\circ$) มีโอกาสเกิดขึ้นกับมุมทั้งสองด้าน

กรณีที่ 2 มุมแหลม

- เงื่อนไขสำหรับมุมทางด้านซ้าย (เส้นลากสีน้ำเงิน)

$$(C_{r(max)} < C_{r(min)}); \theta = \tan^{-1}\left(\frac{r_{(max)} - r_{(min)}}{C_{(max)} - C_{(min)}}\right)$$

- เงื่อนไขสำหรับมุมทางด้านขวา (เส้นลากสีแดง)

$$(C_{r(max)} > C_{r(min)}); \theta = \tan^{-1}\left(\frac{r_{(max)} - r_{(min)}}{C_{(max)} - C_{(min)}}\right)$$

กรณีที่ 3 มุมป้าน

- เงื่อนไขสำหรับมุมทางด้านซ้าย (เส้นลากสีน้ำเงิน)

$$(C_{r(max)} > C_{r(min)}); \theta = 180^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{r_{(max)} - r_{(min)}}{C_{(max)} - C_{(min)}}\right)$$

- เงื่อนไขสำหรับมุมทางด้านขวา (เส้นลากสีแดง)

$$(C_{r(max)} < C_{r(min)}); \theta = 180^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{r_{(max)} - r_{(min)}}{C_{(max)} - C_{(min)}}\right)$$

เมื่อ $r_{(max)}$ คือ ค่า y ของตำแหน่งจุด(pixel) บนเส้นลาก(สีแดงหรือ น้ำเงิน) ที่มีค่ามากที่สุด

$r_{(min)}$ คือ ค่า y ของตำแหน่งจุด(pixel) บนเส้นลาก(สีแดงหรือ น้ำเงิน) ที่มีค่าน้อยที่สุด

$C_{(max)}$ คือ ค่า x ของตำแหน่งจุด(pixel) บนเส้นลาก(สีแดงหรือ น้ำเงิน) ที่มีค่ามากที่สุด

$C_{(min)}$ คือ ค่า x ของตำแหน่งจุด(pixel) บนเส้นลาก(สีแดงหรือ น้ำเงิน) ที่มีค่าน้อยที่สุด

$C_{r(max)}$ คือ ค่า x ณ ตำแหน่งที่ y มีค่ามากที่สุด

$C_{r(min)}$ คือ ค่า x ณ ตำแหน่งที่ y มีค่าน้อยที่สุด

4. การหาค่าความสูง และเส้นผ่าศูนย์กลาง

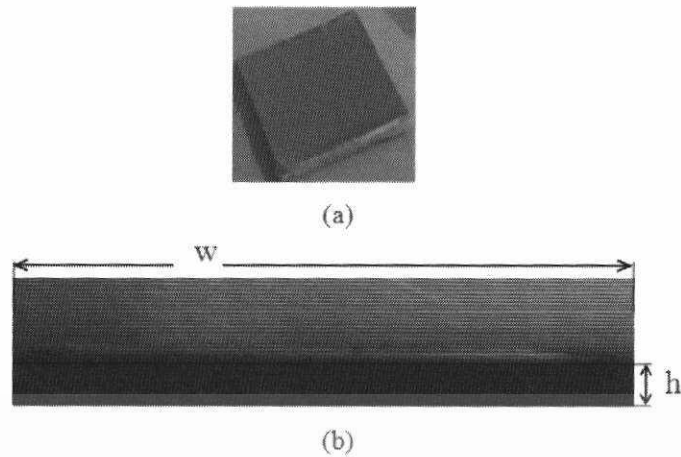
ความสูงและรัศมีของหยดของเหลวสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างขนาดที่แท้จริงของวัตถุที่นำมาเปรียบเทียบและสเกลจากภาพ โดยข้อมูลภาพที่นำมาวิเคราะห์เป็นค่าของ pixel

- แผ่น PCB ตัดขนาด $1.2 \times 1.2 \text{ cm}^2$

- สเกลความกว้างของภาพมีค่า 576 pixels

ดังนั้นอัตราส่วนจึงเท่ากับ $20.833 \mu\text{m}/\text{pixel}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 วิธีการปรับเทียบอัตราส่วนระหว่างวัตถุจริง(a) และสเกลในภาพ(b)

ถ้าในภาพ วัดความกว้างของหยดน้ำได้ 138 pixels ดังนั้นขนาดรัศมีของหยดน้ำเท่ากับ 1.43 mm ในกรณีการหาค่าความสูงก็ทำด้วยวิธีการเดียวกันนี้ในทิศทางของความสูงของแผ่น PCB

การปรับเทียบเพื่อหาขนาดที่แท้จริงนั้นสามารถใช้วัตถุอย่างอื่นในการพิจารณาได้เช่นกัน แต่ควรจะใช้สิ่งที่มีขนาดใกล้เคียงกับสิ่งที่ต้องการวัดมาเป็นตัวเปรียบเทียบหาอัตราส่วน เพราะจะช่วยให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำมากกว่าการใช้ขนาดวัตถุที่มีความแตกต่างกัน

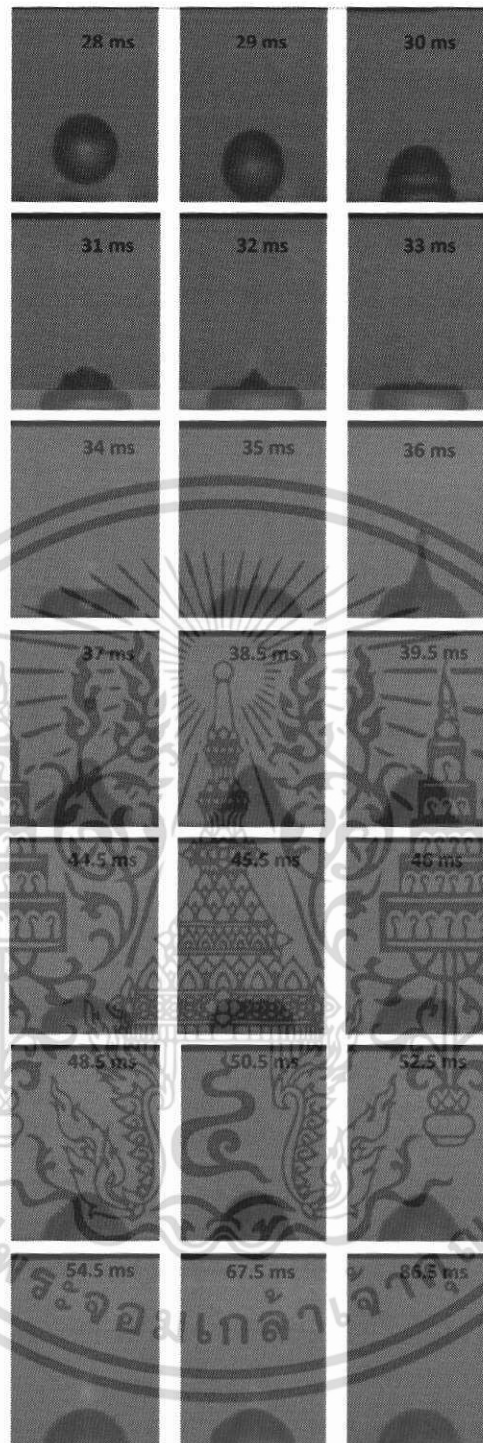
4.3 ผลการทดลอง

4.3.1 ผลการทดลองตัวอย่างภาพถ่ายหยดของเหลวที่เวลาใดๆ

เนื่องจากกำหนดให้ถ่ายภาพด้วยช่วงเวลาระหว่างภาพมีค่าน้อย (250 us)/ภาพ ดังนั้นจึงเก็บบันทึกภาพได้จำนวนมากแต่แสดงให้เห็นเฉพาะช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของหยดของเหลวได้ชัดเจนเพียงเท่านั้นดังรูปที่ 4.9 และจากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่า หยดของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมอย่างรวดเร็วมากในช่วงแรกเริ่มที่ตกกระทบพื้นผิว และมีลักษณะคล้ายกับคลื่นเป็นช่วงระยะเวลาสั้นๆ แล้วจึงค่อยๆ หยดนิ่งอยู่บนพื้นผิวเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ทั้งหมดนี้จึงจะเห็นได้จากช่วงเวลาที่บ้านที่มีความถี่มากในตอนต้น(ประมาณ 1 ms) และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลาห่างกันประมาณเกือบ 20 ms

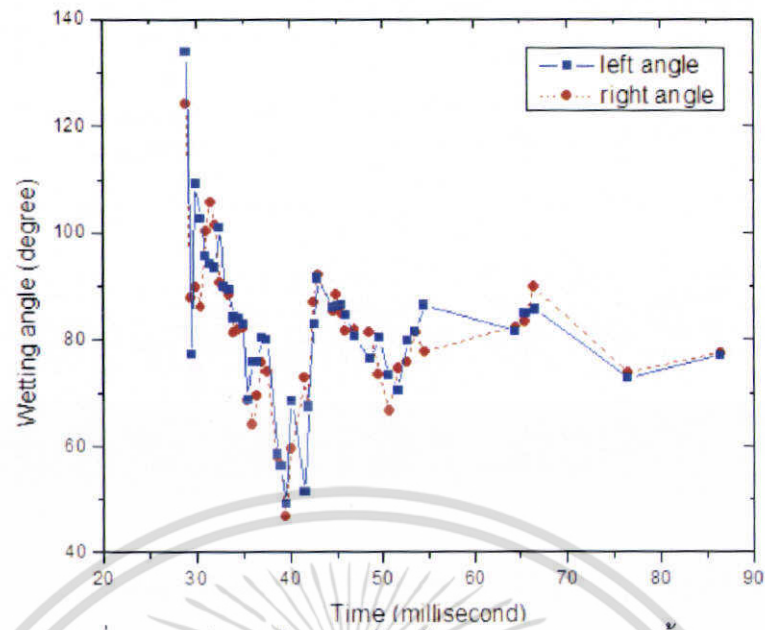
4.3.2 กราฟผลการทดลองวัดค่ามุมเปียก ความสูง และเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดของเหลว

ผลการทดลองวัดค่ามุมเปียก ความสูง และเส้นผ่าศูนย์กลางหยดของเหลวจากภาพถ่ายหยดของเหลวทั้งหมดตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งหยดของเหลวหยุดนิ่งอยู่บนพื้นผิว PCB แสดงด้วยกราฟดังรูปที่ 4.10-4.12

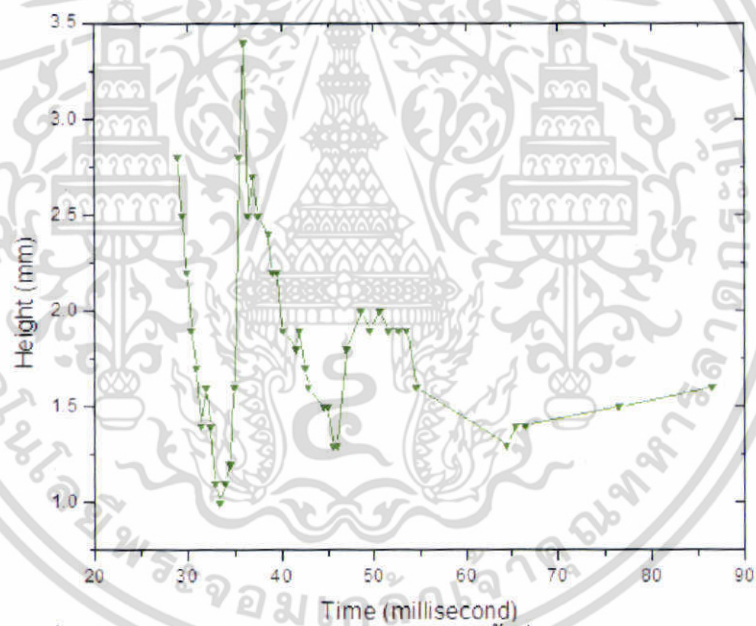


รูปที่ 4.9 ลักษณะเชิงพลวัตของหยดน้ำตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งหยุดนิ่งบนพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

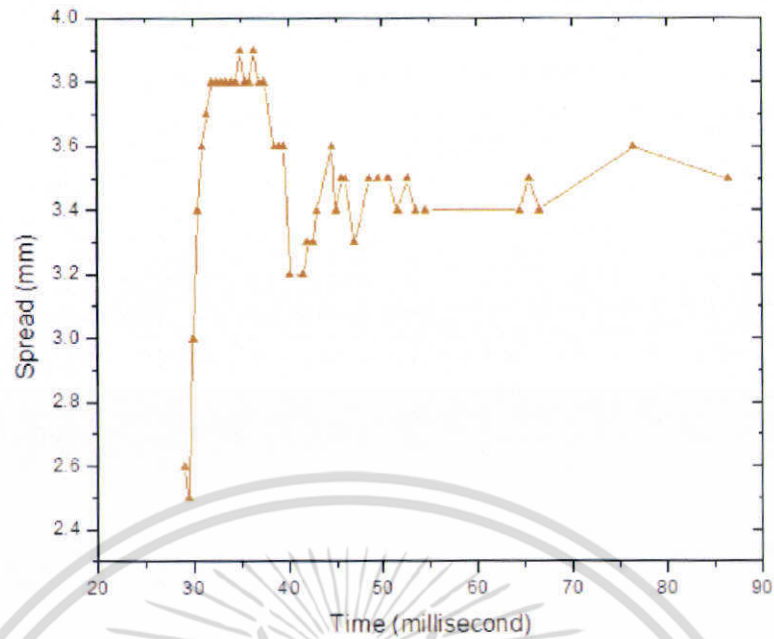


รูปที่ 4.10 ค่ามุมเปียกทางด้านซ้าย และขวาของหยดน้ำ



รูปที่ 4.11 ผลการทดลองความสูงของหยดน้ำที่เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ผลการวัดขนาดการขยายตัวของหยดน้ำ

พบว่าค่ามุมเปียกทั้งสองด้านมีแนวโน้มลักษณะเดียวกันคือ ลดลงอย่างมากและต่อเนื่องในช่วงแรกที่ตกกระทบพื้น จากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและคงที่ประมาณ 80 องศา ซึ่งถือว่าหยดน้ำยังสามารถเปียกอยู่บนพื้นผิวได้ แสดงว่าพลังงานระหว่างพื้นผิว PCB บริเวณที่สัมผัสกับหยดน้ำยังมีค่ามากพอซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะระหว่างคู่ของวัสดุและพื้นผิวใดๆ

ความสูงหยดของเหลวที่เปลี่ยนแปลง สังเกตเห็นว่ามีเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างชัดเจนในช่วงระยะเวลาสั้นๆ นั้นเป็นเพราะแรงกระแทกของหยดน้ำที่เกิดจากระดับความสูงระหว่างปลายเข็มและพื้นผิว(5 mm) จากกราฟความสูงที่สูงสุดกับความสูงเมื่อหยดน้ำหยุดนิ่งบนพื้นผิวมีค่าต่างกันมากถึง 2 mm ซึ่งสอดคล้องกับรูปผลการทดลองที่หยดน้ำมีการสั่นตัวและมีลักษณะเป็นคลื่นระยะเวลาหนึ่ง

ลักษณะกราฟการขยายตัวของหยดของเหลวค่อนข้างแตกต่างจากกราฟแสดงค่ามุม และความสูง คือ มีลักษณะเพิ่มขึ้นในตอนแรกแล้วจึงค่อยๆ คงที่ แต่กราฟอีก 2 รูปมีแนวโน้มของเส้นกราฟลดลงก่อนที่จะเริ่มคงที่

อย่างไรก็ตาม กราฟทั้ง 3 รูปยังคงแสดงให้เห็นถึงสิ่งที่คล้ายกันประการหนึ่ง คือ เส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากและชัดเจนในตอนเริ่มต้นหลังจากที่หยดของเหลวตกกระทบพื้นแล้ว ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วที่ตกกระทบพื้น และสุดท้ายเมื่อหยดของเหลวหยุดนิ่งอยู่บนพื้นค่าดังกล่าวจะเป็นอย่างไรก็ขึ้นอยู่กับค่าแรงระหว่างโมเลกุลของวัสดุและพื้นผิวนั้น(adhesion force)

บทที่ 5

การหาค่าพารามิเตอร์ของของเหลวจากระบบ การถ่ายภาพของเหลว

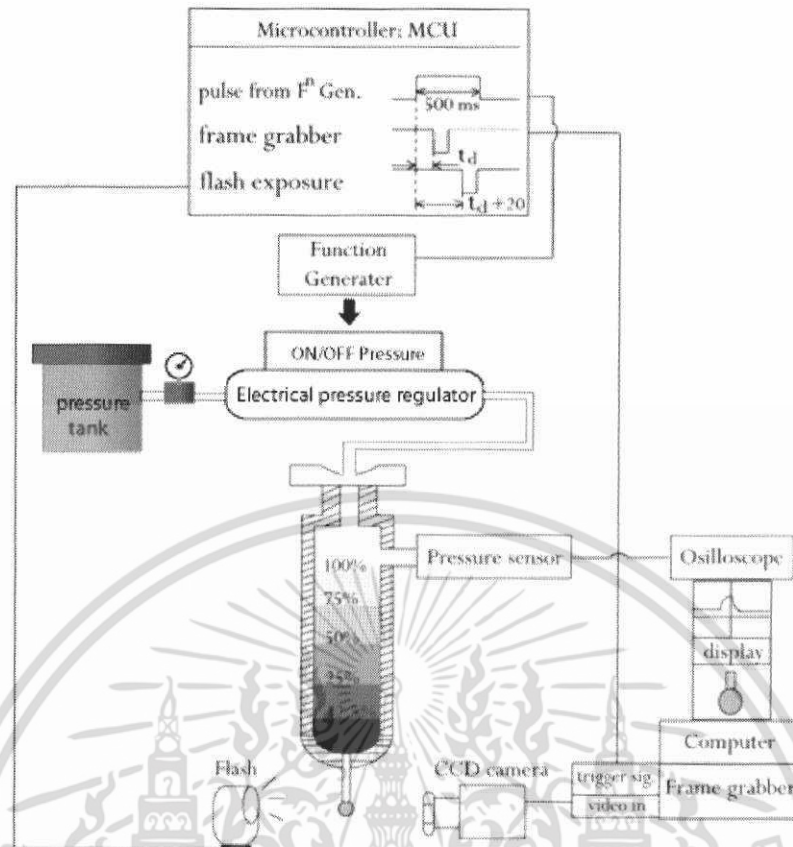
5.1 แนวความคิดที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์สำหรับควบคุมอัตราการไหล

จากการศึกษาของงานวิจัยของ C.P.Chen และคณะ[11] ที่นำเสนอวิธีการหาค่าอัตราการไหล Q เพื่อควบคุมขนาดหยดของเหลวโดยใช้สมการ fluid flow model พื้นฐานดังอธิบายไว้ในบทที่ 2 สมการที่ (2.13), (2.15) และ (2.17) โดยค่าพารามิเตอร์ N และ K_0-K_3 ถูกใช้สำหรับการคำนวณอัตราการไหลซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อระดับของเหลวเปลี่ยนไปดังที่งานวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมไว้แล้ว แต่สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวด้วยวิธีการจัดอุปกรณ์การทดลอง โดยรายละเอียดมีดังนี้

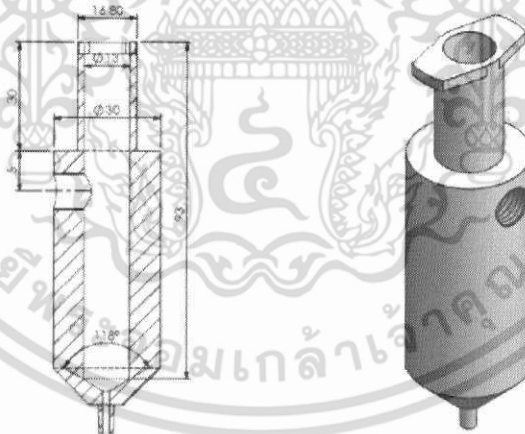
5.2 วิธีการทดลอง

1. จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูป 5.1 บรรจุน้ำหวานยี่ห้อ Helbluboy ปริมาตร 8 มิลลิลิตร (100% of full scale จากตำแหน่งที่ต่อ pressure sensor) ลงในกระบอกหยดของเหลวมีลักษณะที่ใช้งานจริงแสดงดังรูป 5.2 จ่ายแรงดันลมด้วยค่าประมาณ 3.5 MPa ซึ่งถูกควบคุมด้วยสัญญาณไฟฟ้าจาก function generator ถ่ายภาพหยดของเหลวและบันทึกผลสัญญาณจาก pressure sensor โดยเริ่มต้นที่เวลา: $t_0 = 0-500$ ms (t_0 เพิ่มขึ้นครั้งละ 25 ms) จากนั้นทำการทดลองซ้ำแต่ครั้งต่อไปให้ลดระดับน้ำหวานเป็น 75%, 50%, 25% และ 12.5% of full scale ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการทดลองแบบเดียวกันนี้อีก 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย

2. คำนวณค่าปริมาตร การหาปริมาตรของหยดของเหลวซึ่งเป็น 3D สามารถพิจารณาได้จากภาพ 2D โดยงานวิจัย[12] ได้นำเสนอวิธีการหาปริมาตรด้วยการตัดขวางภาพ 2D ทั้งภาพในแนวแกน X เป็นชั้นบางๆ ดังนั้นภาพที่ถูกตัดจึงอาจพิจารณาเป็นทรงกระบอกแผ่นบางที่มีความหนาเท่ากับ h และมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับควมกว้างของภาพนั้นๆ ที่ถูกตัด เนื่องจากวิธีนี้กำหนดให้ภาพมีความสมมาตรรอบแกน y ดังนั้นปริมาตรจึงหาได้จากสมการปริมาตรของทรงกระบอกนั่นคือ $V = \sum_{n=1}^L v_n$ เมื่อ $v_n = \pi r^2 h$ และยิ่งถ้าภาพถูกตัดด้วยความบางมากๆ จะทำให้ความแม่นยำของปริมาตรมีมากยิ่งขึ้น(เป็นการช่วยลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการตัดขอบภาพ ซึ่งความบางมากที่สุดคือที่ระดับ 1 pixel ของภาพ)



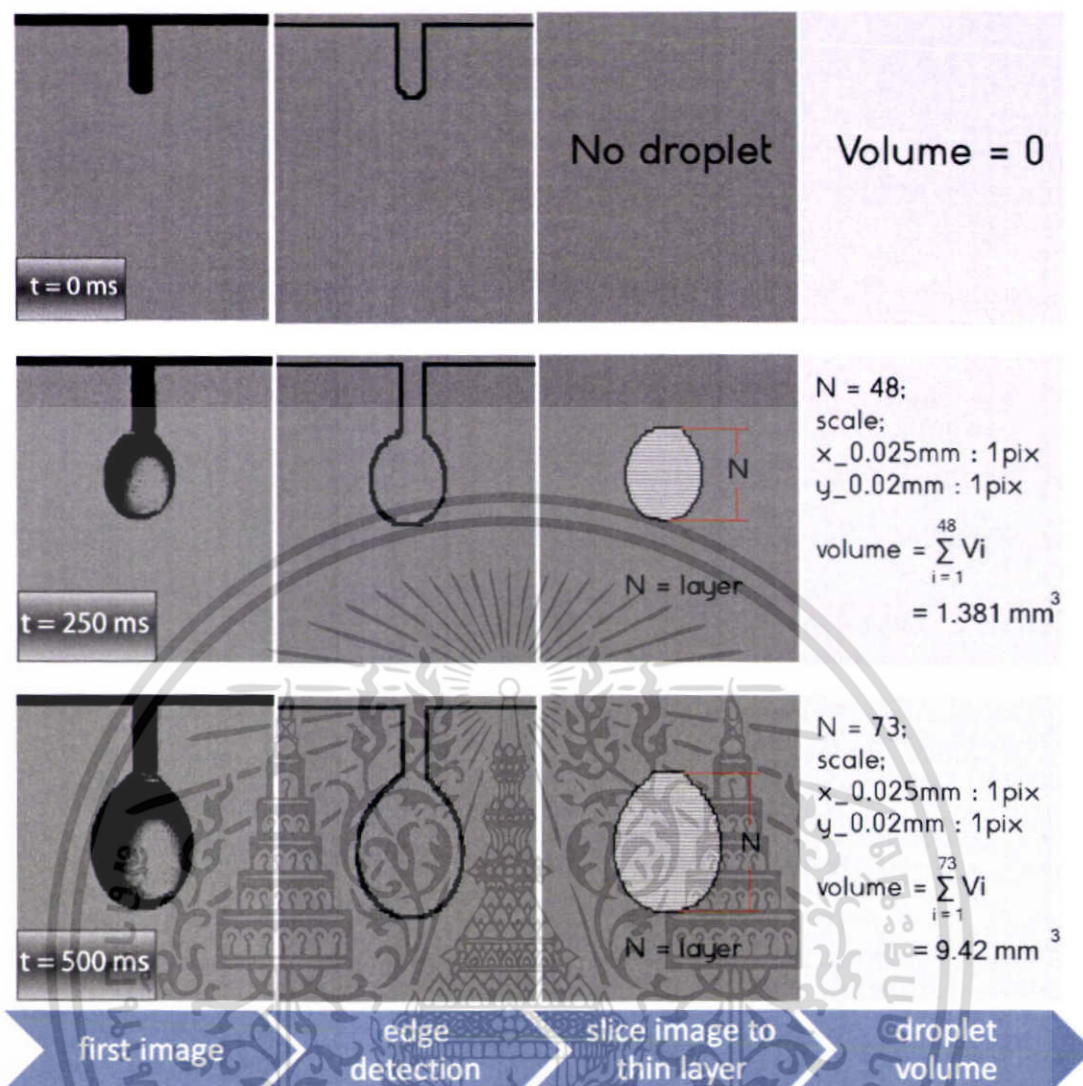
รูปที่ 5.1 การจัดอุปกรณ์การทดลองเพื่อศึกษาอัตราการไหลของเหลว



รูปที่ 5.2 โครงสร้างกระบอกบรรจุน้ำหวานสำหรับการทดลองวัดอัตราการไหล

รูปที่ 5.3 เป็นตัวอย่างการหาปริมาตรหยดของเหลวด้วยวิธีดังกล่าวที่ระดับน้ำหวาน 12.5% of full scale ณ เวลา $t=0$, 250 และ 500 ms ใช้โปรแกรม imageJ สำหรับการหาขอบภาพ จากนั้นใช้โปรแกรม Matlab ในการหาปริมาตร(รายละเอียดของโปรแกรมแสดงในเอกสารอ้างอิง) ซึ่งค่า N ในสมการคือ จำนวนชั้น/แผ่นของภาพที่ถูกตัด $x-y$ scale คือการสเกลระหว่างภาพกับขนาดจริง สุดท้ายจึงได้ปริมาตรของหยดของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 วิธีการคำนวณค่าปริมาตร

3. คำนวณอัตราการไหล(Q) เนื่องจากอัตราการไหล คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเทียบกับเวลา(dV/dt) ดังนั้น ค่า Q จึงพิจารณาได้จากการดิฟสมการที่ได้จากการ fit curve ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและเวลา

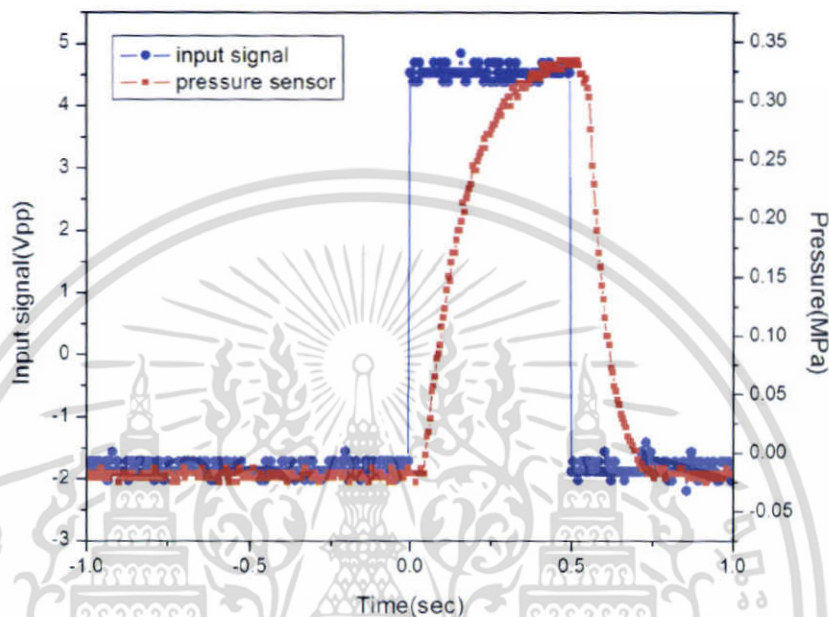
4. ทำการทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนวัสดุที่ใช้จากน้ำหวานเป็นน้ำมันมะกอกแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดลอง(กรณีน้ำหวาน)

5.3.1 ผลการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และแรงดันลม

รูปที่ 5.4 แสดงขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ electrical pressure regulator และปริมาณแรงดันที่วัดได้จาก pressure sensor ที่ต่อไว้อยู่กับระบบกัก



รูปที่ 5.4 สัญญาณที่ป้อนและที่วัดจาก pressure sensor

จากกราฟจะเห็นว่าผลตอบสนองของสัญญาณจาก pressure ต่อสัญญาณ input มีลักษณะเป็น first order response (square line) กราฟผลการตอบสนองที่เป็นลักษณะเช่นนี้เพราะ แรงดันลมถูกส่งผ่านอุปกรณ์ เช่น สายลม และข้อต่อต่างๆ ก่อนที่จะมาถึงระบบกัก ดังนั้นจึงอาจมีการหน่วงเวลาเกิดขึ้นได้ และเนื่องจากค่า time constant ของกราฟในช่วง ON-OFF dispensing ไม่เท่ากัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาตรน้ำหวานในระบบกักแตกต่างกันในช่วงระหว่างที่ ON -OFF ดังนั้นในการพิจารณา fluid dispensing model นี้จึงใช้ช่วงเวลา ON

5.3.2 ผลการบันทึกภาพอัตราการไหลของหยดน้ำหวานที่เวลาใดๆ (ระยะห่างภาพละ 25 ms)

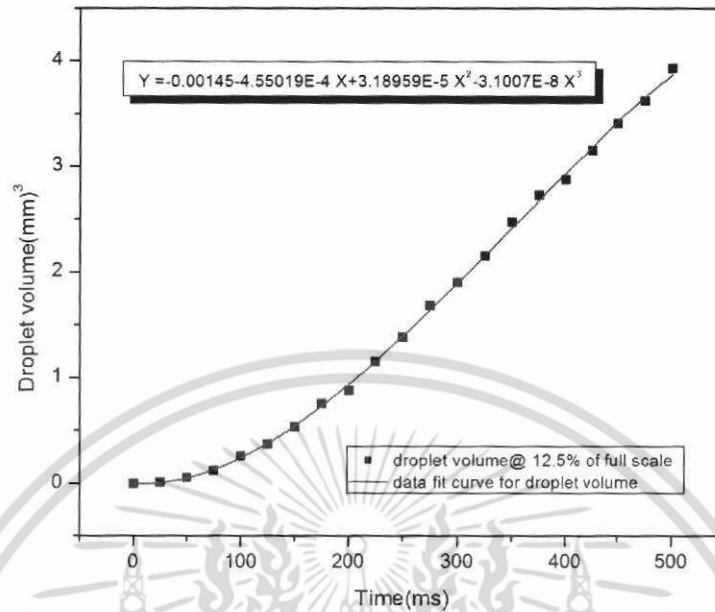


รูปที่ 5.5 ภาพหยดน้ำหวานขณะโตตั้งแต่ในช่วงเวลา ON (0-500 ms)ของพัลส์ในรูป 5.4

5.3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่เวลาใดๆ (on time)

เนื่องจากทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ในแต่ละครั้งทดลองที่ระดับน้ำหวาน 5 ระดับ ดังนั้นจะได้กราฟ และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจำนวน 20 ตัวอย่าง แต่ในที่นี้จะยกเพียงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

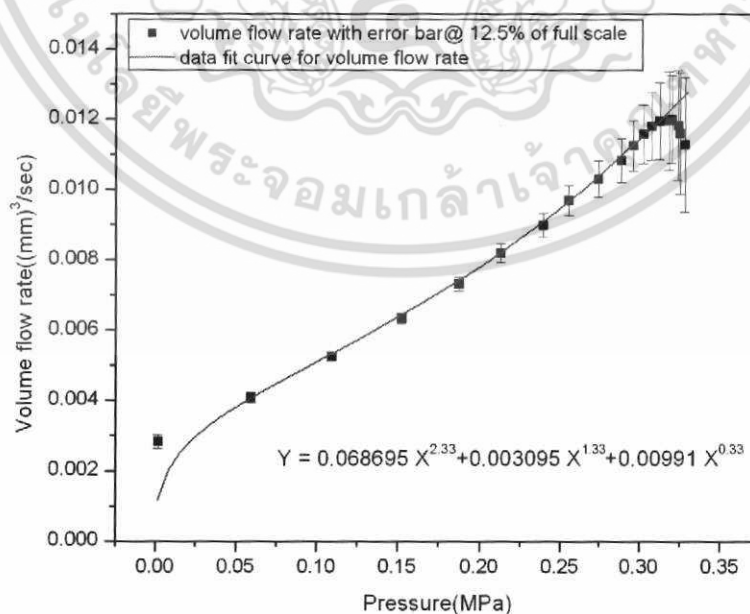
ตัวอย่างเดียว คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรกับเวลากรณีที่ระดับน้ำหวาน 12.5% of full scale และทำการ fit curve ข้อมูลจะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ดังรูป 5.6



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาตรของหยดน้ำหวานที่เวลาใดๆ ที่ระดับของเหลว 12.5% of full scale

5.3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน

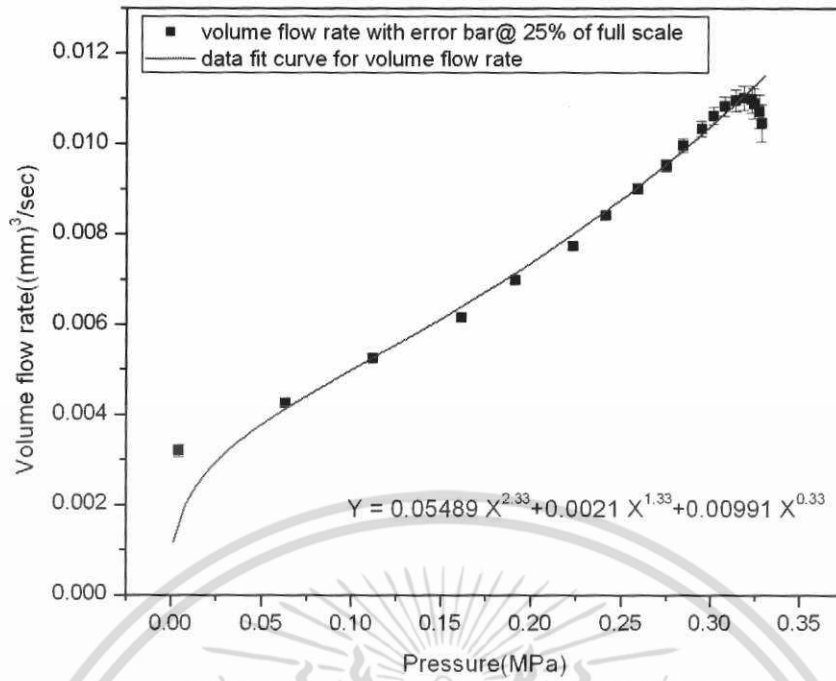
ดิฟสมการที่ได้จากการ fit curve ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลาของข้อมูลที่เหลือ เช่นเดียวกับวิธีที่แสดงในรูป 5.6 ทั้งหมดจำนวน 20 สมการ จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของอัตราการไหล และค่า error bar ที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้ง ที่ระดับน้ำหวานค่าต่างๆ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.7-5.11



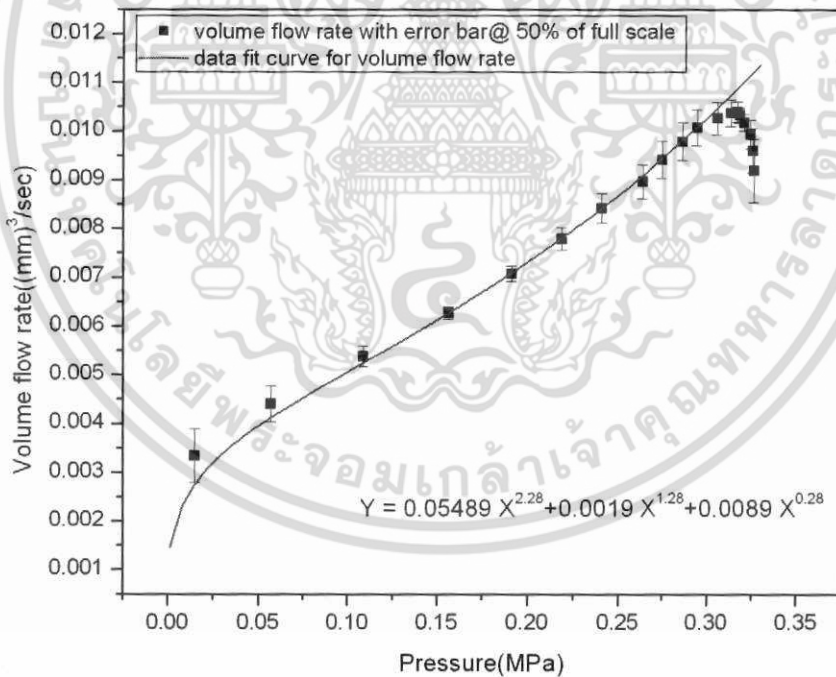
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve

ด้วยสมการ General power-law fluid ที่ระดับน้ำหวาน 12.5% of full scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติเห็นาเป็เซประเยชนดานการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

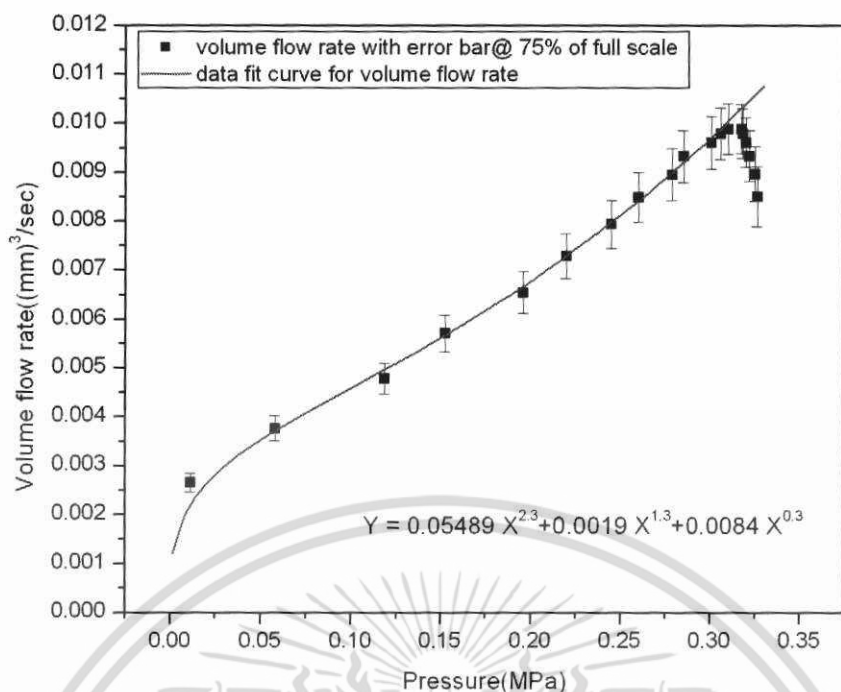


รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General power-law fluid ที่ระดับน้ำหวน 25% of full scale

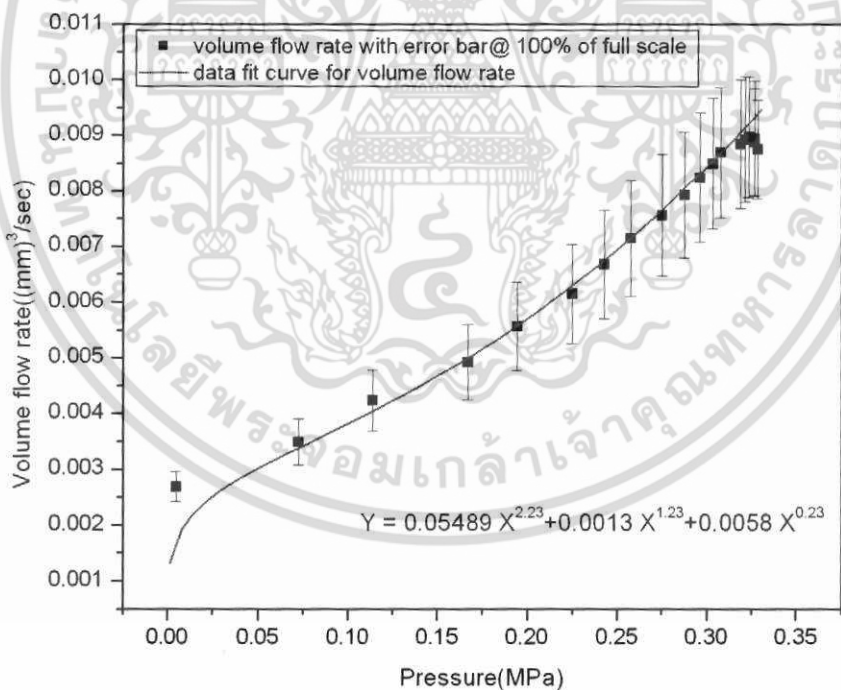


รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General power-law fluid ที่ระดับน้ำหวน 50% of full scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



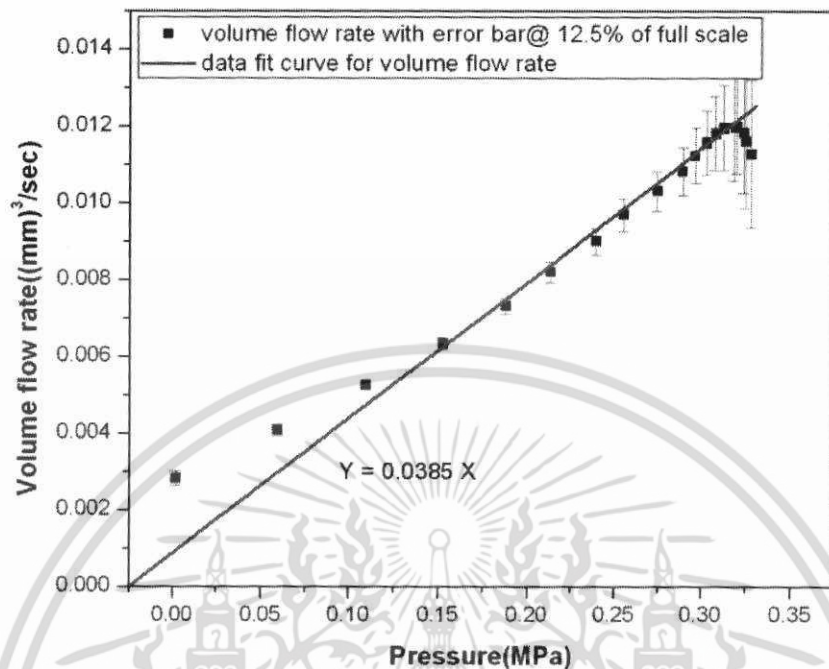
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General power-law fluid ที่ระดับน้ำหวน 75% of full scale



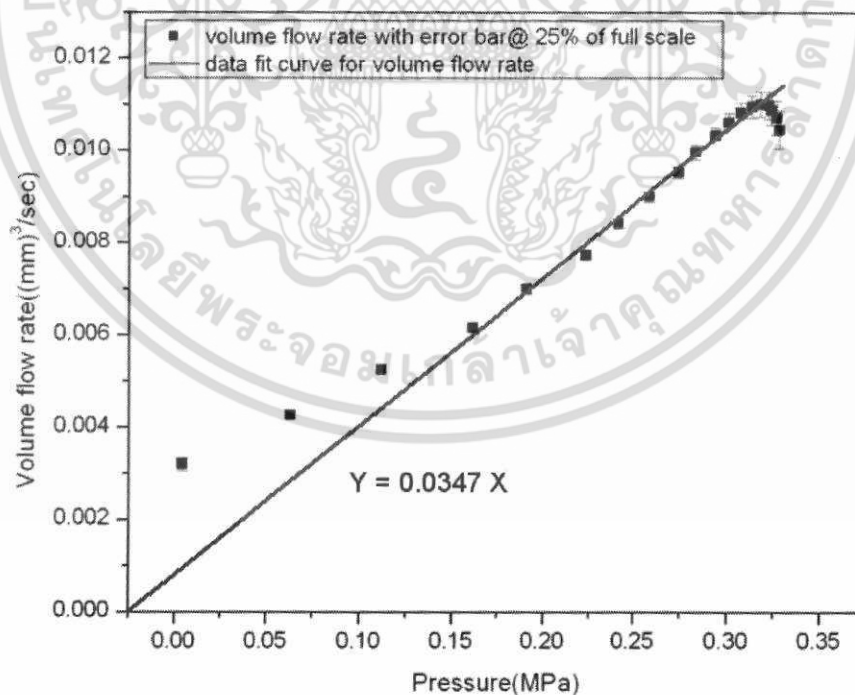
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General power-law fluid ที่ระดับน้ำหวน 100% of full scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากผลการทดลองเดิมของน้ำหวาน แต่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid แสดงดังรูปที่ 5.12-5.16

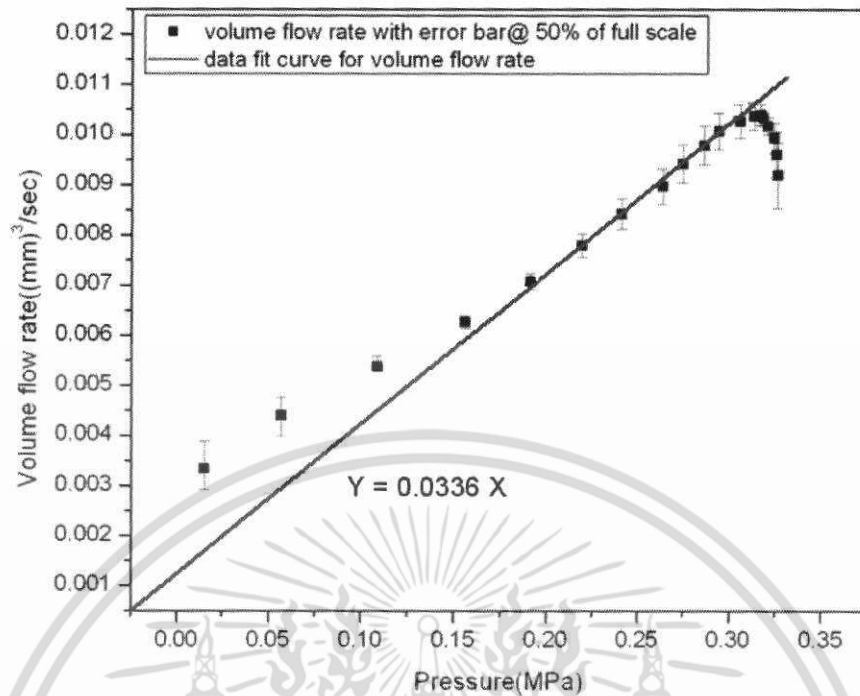


รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำหวาน 12.5% of full scale

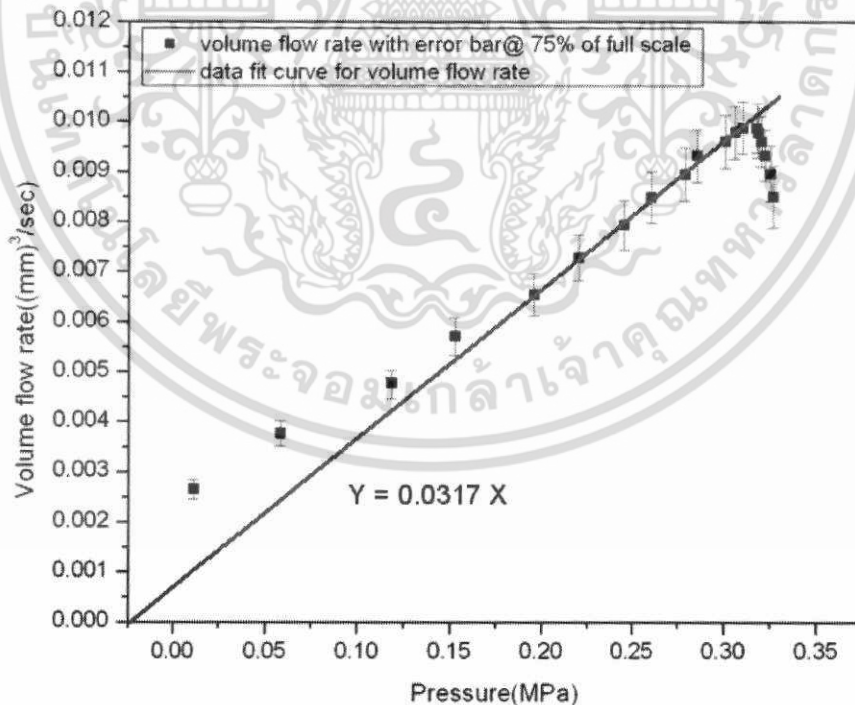


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำหวาน 25% of full scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

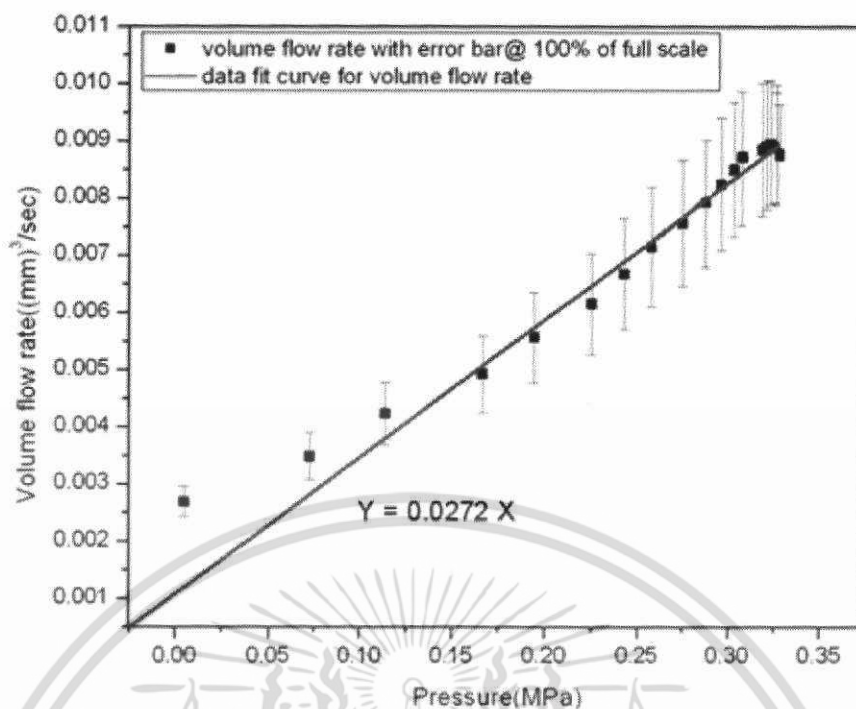


รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำหวาน 50% of full scale



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำหวาน 75% of full scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำหวาน 100% of full scale

เนื่องจากของเหลวแต่ละประเภทไม่สามารถระบุได้ว่าเป็น Newtonian หรือ non Newtonian fluid ในเบื้องต้น แต่จะสามารถทราบได้ว่าเป็นชนิดใดเมื่อได้ทำการทดลอง โดยในรายงานนี้ได้ใช้วิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล และแรงดันว่าเป็นไปตามลักษณะของประเภทของเหลวชนิดใด และจากผลการทดลองที่ได้จึงทำการ fit curve ด้วยสมการทั้งสองแบบ คือ Newtonian และ non Newtonian fluid ผลปรากฏว่าน้ำหวานเป็นของเหลวประเภท non - Newtonian fluid (ชนิด pseudoplastic หรือ shear thinning fluid: ค่า $N = 2.33(n=0.43)$) เนื่องจากสมการ General power-law fluid ที่ใช้ในการ fit curve นั้นสอดคล้องกับข้อมูลได้ดี และดีกว่ากรณีที่ใช้สมการ Newtonian fluid

จากกราฟจะพบว่าเมื่อระดับของเหลวเพิ่มขึ้น อัตราการไหลจะลดลง ค่าสัมประสิทธิ์ ($K_1 - K_3$) และกำลังสูงสุด (N) ของสมการที่ได้จากการ fit curve ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Q) และแรงดัน (P) ด้วยสมการ General Power-law (สมการที่ 5.5) ผลแสดงในตารางที่ 5.1

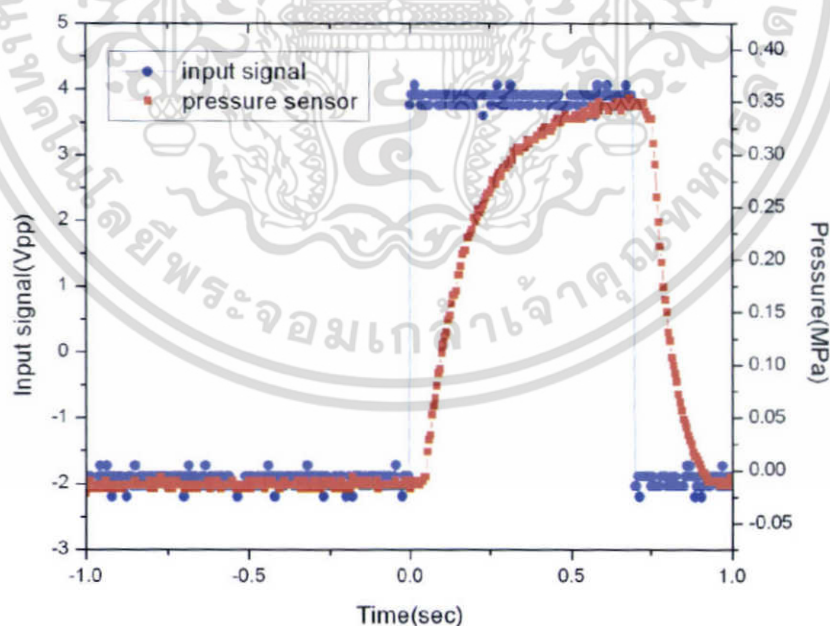
ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองค่าตัวแปร N และ $K_1 - K_3$ ที่ระดับน้ำหวนค่าต่างๆ

Volume	K_1	K_2	K_3
100% ($N = 2.23$)	0.05489	0.0013	0.0058
75% ($N = 2.3$)	0.05489	0.0019	0.0084
50% ($N = 2.28$)	0.05489	0.0019	0.0089
25% ($N = 2.33$)	0.05489	0.0021	0.0099
12.50% ($N = 2.33$)	0.06869	0.0031	0.0099

จากตารางค่า $K_1 - K_3$ และ N เพิ่มขึ้นเมื่อระดับน้ำหวนลดลง ซึ่งค่า N มีความต่างกันในกลุ่มค่อนข้างมากกว่าค่า $K_1 - K_3$ นั้นอาจเป็นเพราะ คุณสมบัติของของไหลที่มีผลมากกว่าโครงสร้างของกระบอกหยดที่ใช้ ดังนั้นการควบคุมระบบหยดของเหลวให้มีความคงที่ จะต้องคำนึงถึงชนิดของของเหลวที่ใช้ และระดับของเหลวที่เหลืออยู่ในกระบอกโดยใช้ค่าตัวแปร $K_1 - K_3$ และ N สำหรับการควบคุมระบบหยดให้มีความคงที่

5.4 ผลการทดลอง(กรณีน้ำมันมะกอก)

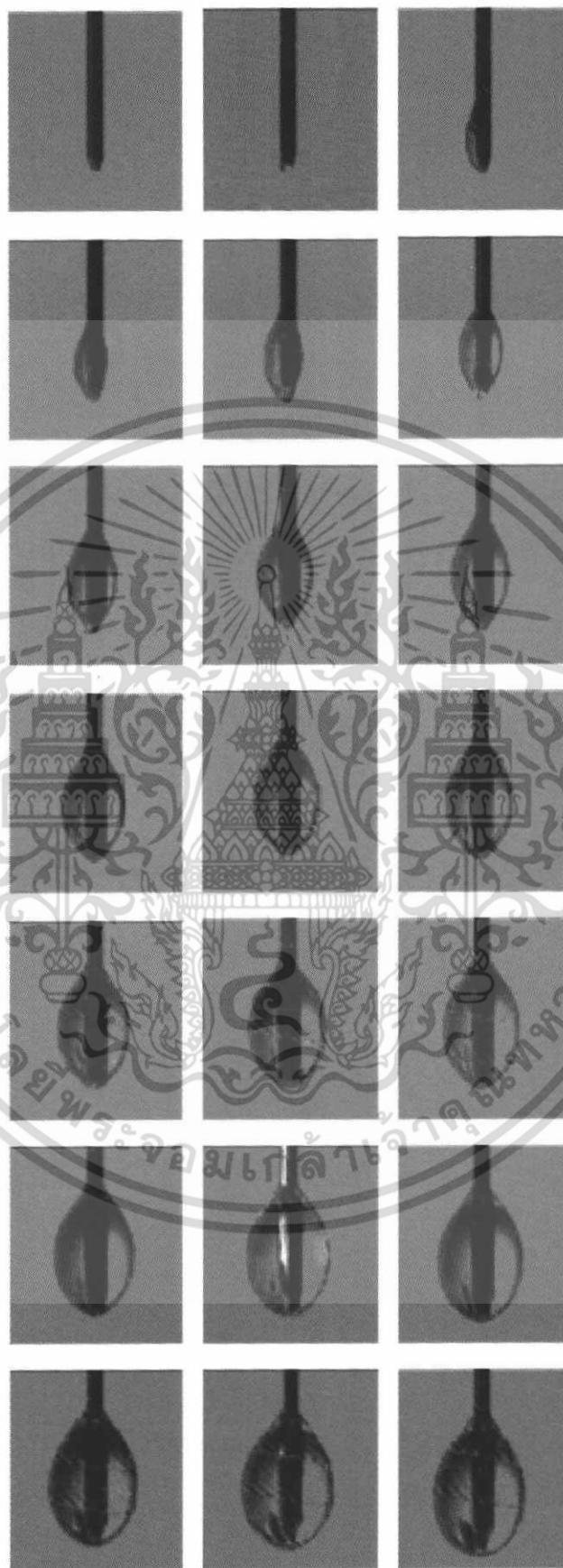
5.4.1 ผลการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และแรงดันลม



รูปที่ 5.17 สัญญาณที่ป้อนและที่วัดจาก pressure sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

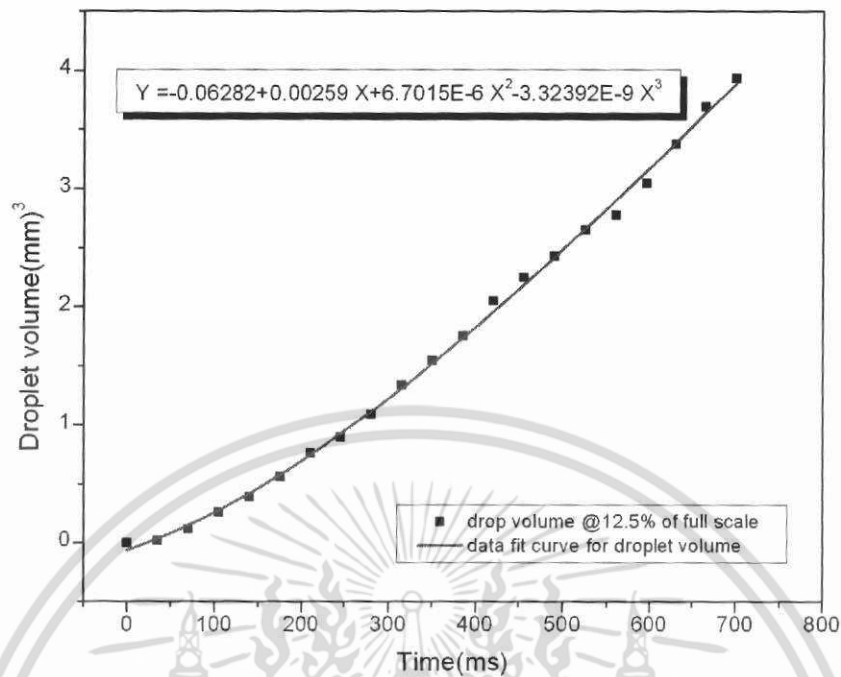
5.4.2 ผลการบันทึกภาพอัตราการไหลของหยดน้ำมันมะกอกที่เวลาใดๆ(ระยะห่างภาพละ 35 ms)



รูปที่ 5.18 ภาพหยดน้ำมันมะกอกขณะไต่ตั้งแต่ในช่วงเวลา ON (0-700 ms)ของพัลส์ในรูป 5.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

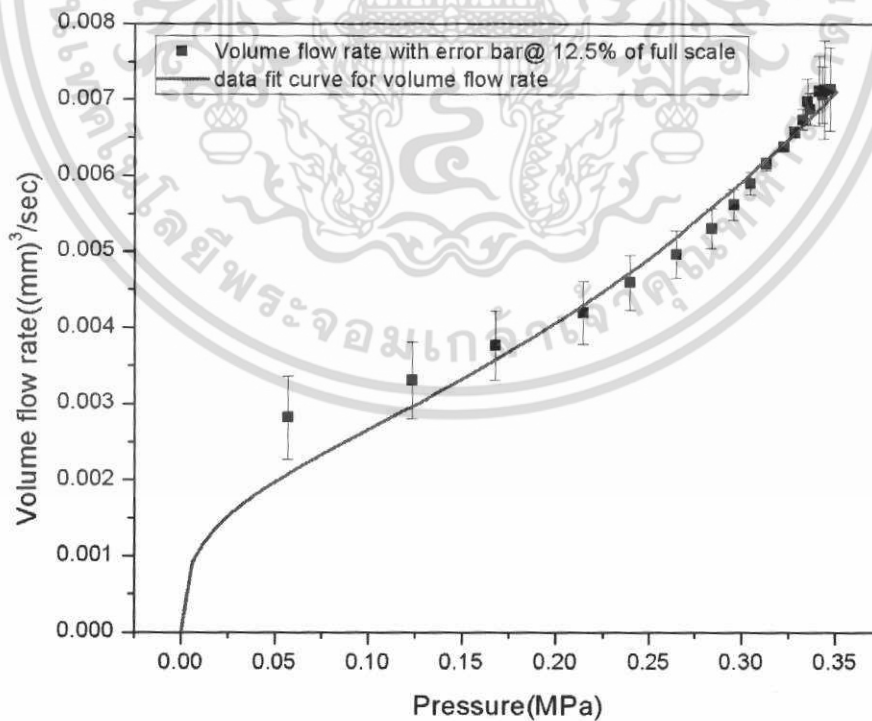
5.4.3 กราฟและสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา



รูปที่ 5.19 กราฟและสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา

5.4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน

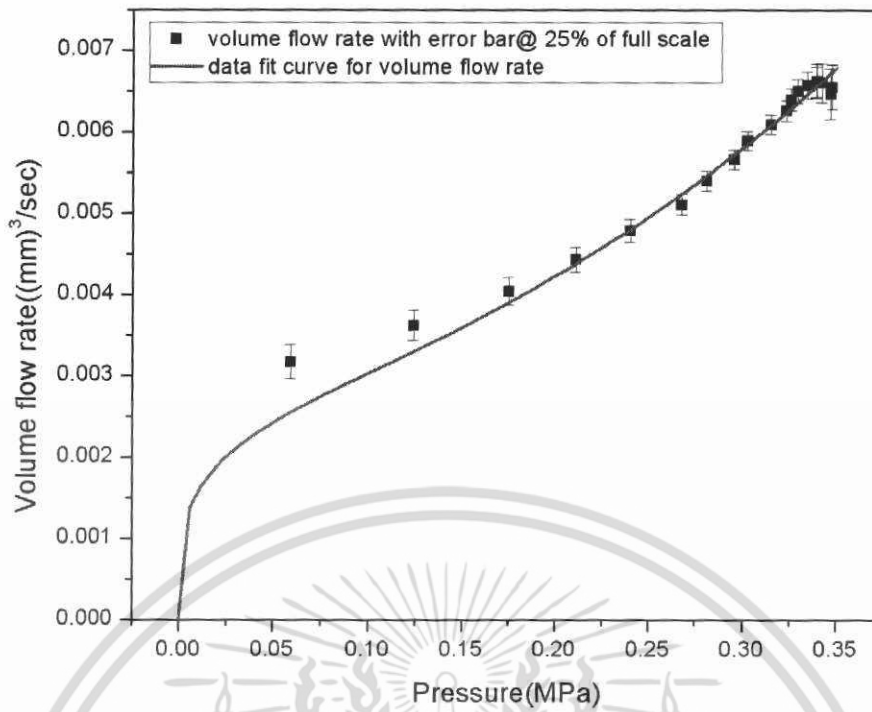
กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General power-law fluid



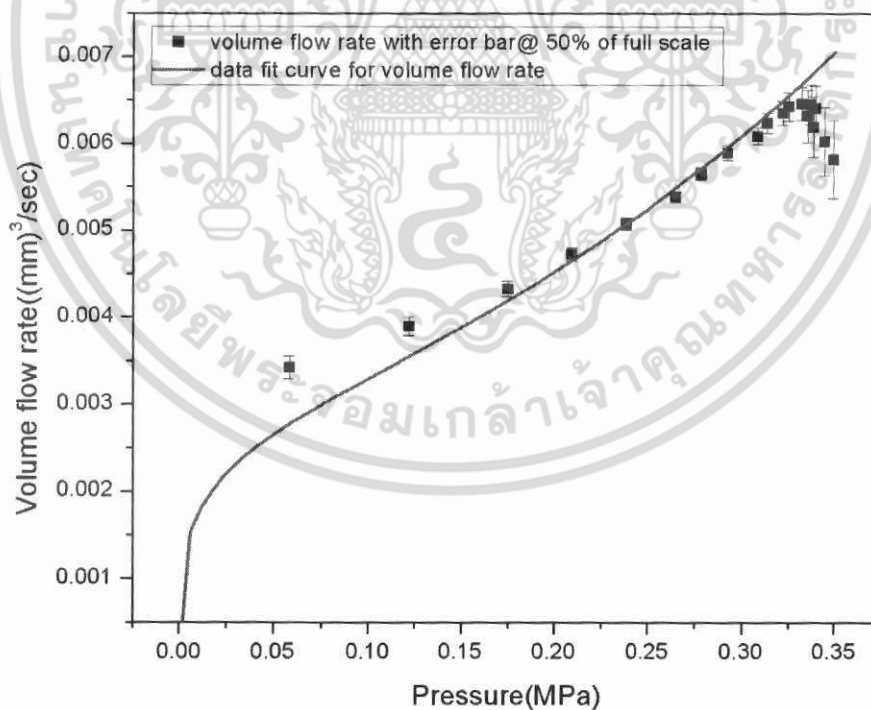
รูปที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve

ด้วยสมการ General Power-law fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 12.5% of full scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

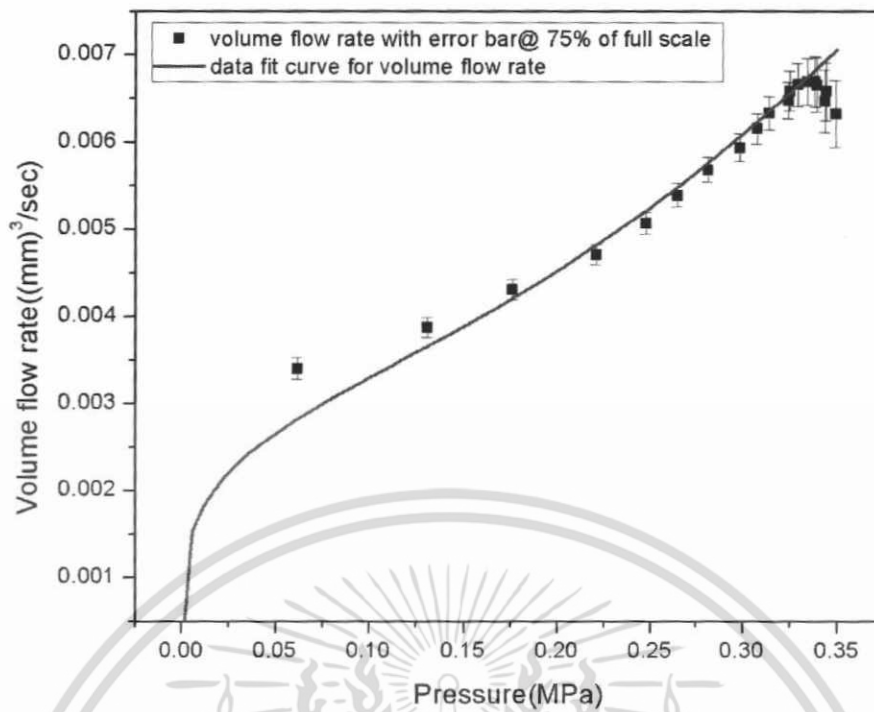


รูปที่ 5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General Power-law fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 25% of full scale

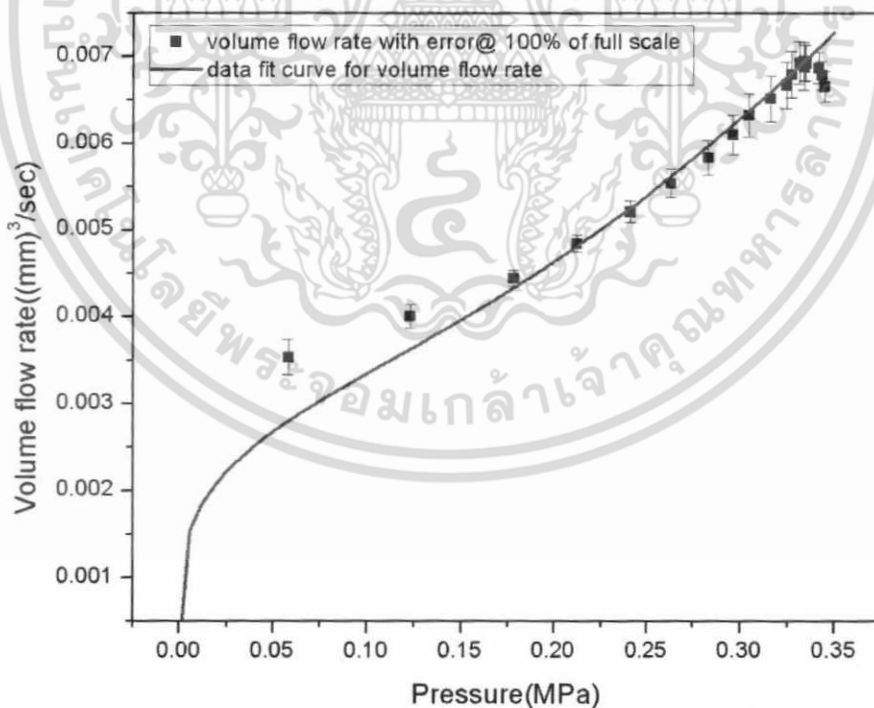


รูปที่ 5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General Power-law fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 50% of full scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



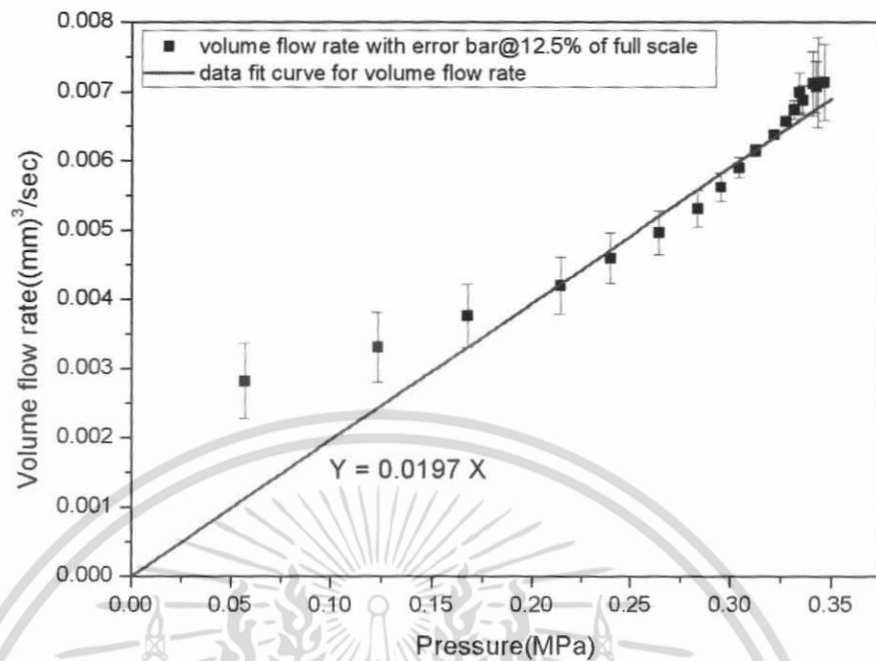
รูปที่ 5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General Power-law fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 75% of full scale



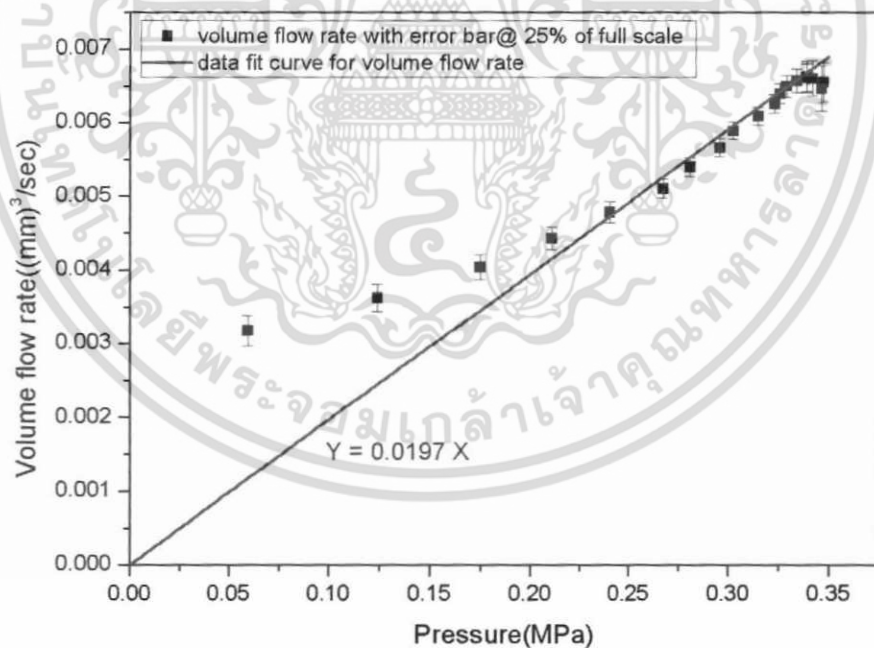
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ General Power-law fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 100% of full scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid

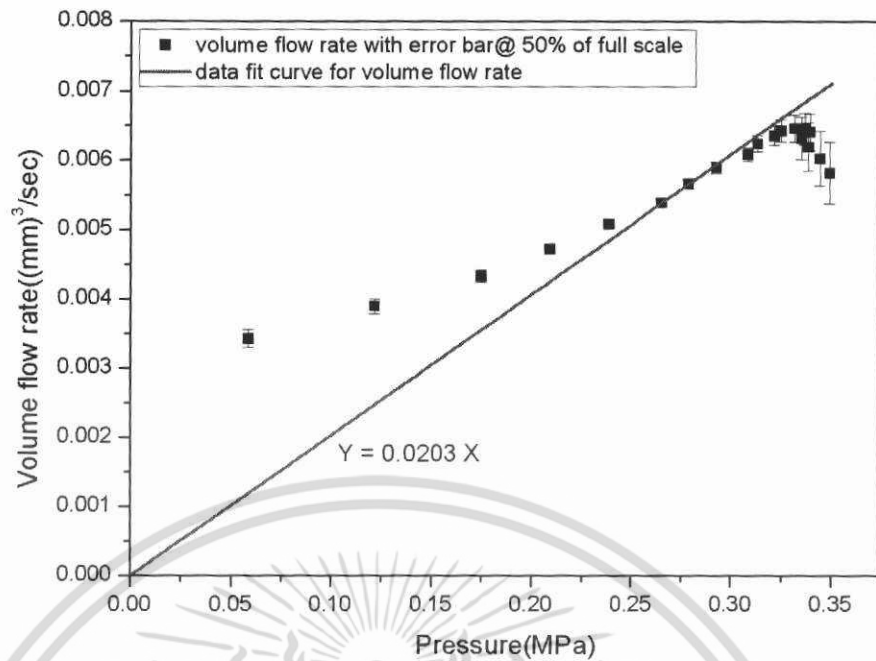


รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 12.5% of full scale

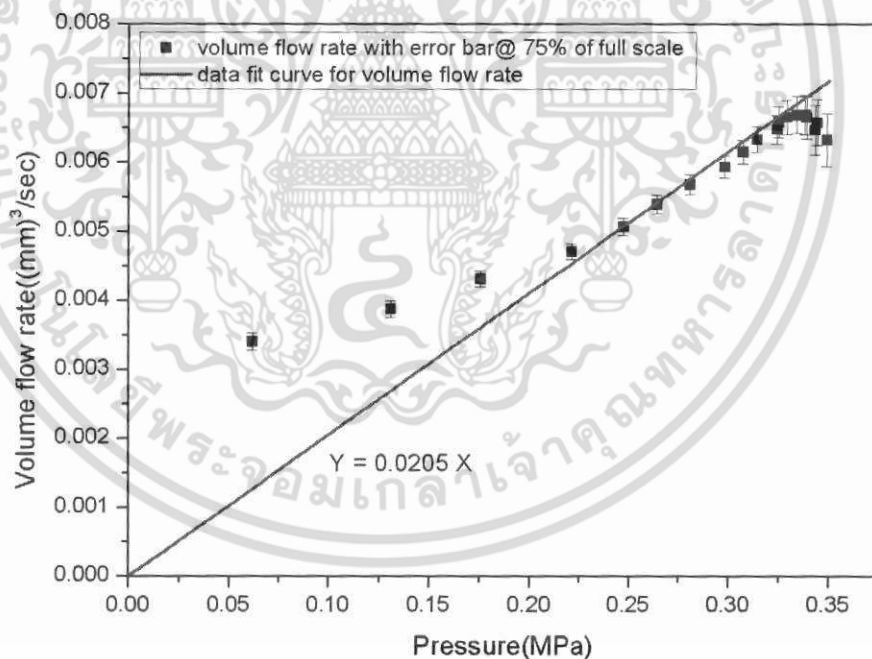


รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 25% of full scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

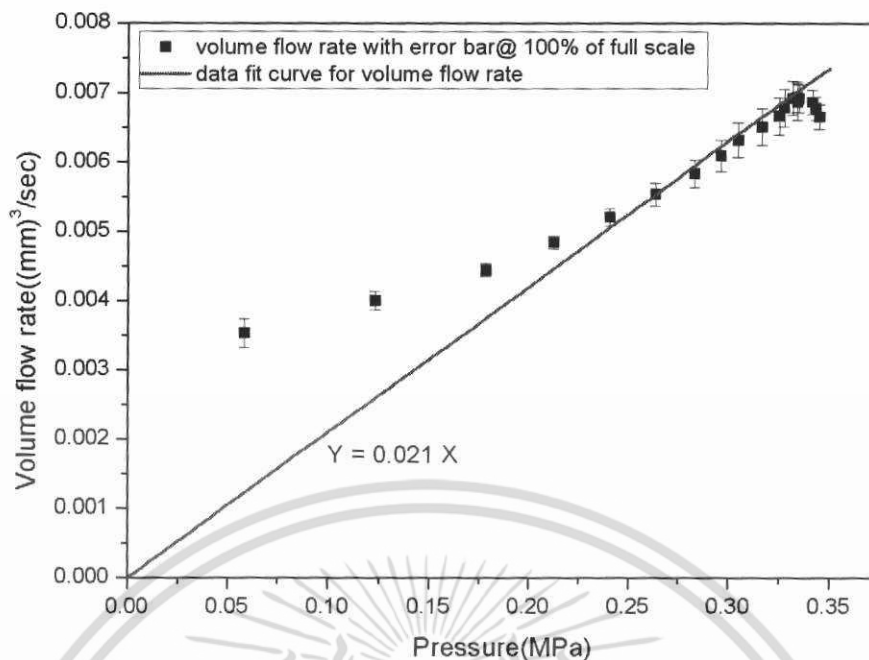


รูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 50% of full scale



รูปที่ 5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 75% of full scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน กรณีที่ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ที่ระดับน้ำมันมะกอก 100% of full scale

จากผลการทดลองการ fit curve กรณีน้ำมันมะกอก แสดงให้เห็นว่าน้ำมันมะกอกก็มีคุณสมบัติเป็นของเหลวประเภท non-Newtonian fluid เช่นเดียวกับน้ำหวานดังจะเห็นได้จากสมการ General Power-law fluid ที่ใช้ในการ fit curve นั้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลมากกว่าการ fit curve ด้วยสมการ Newtonian fluid ซึ่งค่าพารามิเตอร์ N และ $K_1 - K_3$ ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองค่าตัวแปร N และ $K_1 - K_3$ ที่ระดับน้ำหวานค่าต่างๆ

Volume	K_1	K_2	K_3
12.5% ($N=2.35$)	0.036	0.0001	0.0055
25% ($N=2.26$)	0.030	0.0001	0.0052
50% ($N=2.25$)	0.028	0.0007	0.0055
75% ($N=2.25$)	0.028	0.0007	0.0055
100% ($N=2.25$)	0.028	0.0015	0.0055

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอวิธีการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของหยดของเหลว และแนวทางการพัฒนาระบบหยดของเหลวให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น ขั้นตอนการหยดของเหลวเริ่มขึ้นตั้งแต่หยดของเหลวหยดออกจากภาชนะบรรจุ จนกระทั่งหยดของเหลวตกกระทบพื้นผิว มีลักษณะพฤติกรรมเชิงพลวัตเป็นอย่างไร และหลังจากหยดหนึ่งอยู่บนพื้นผิวแล้วสามารถเกาะอยู่บนพื้นผิวได้มากน้อยเท่าใดล้วนเป็นข้อมูลที่สำคัญในงานลักษณะที่ต้องการ “droplet on demand” ทั้งสิ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้แบ่งการศึกษาเป็น 2 กรณี คือ ศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของหยดของเหลวตั้งแต่เริ่มหยดของเหลวจนกระทั่งหยดหนึ่งบนพื้นผิวโดยใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยเทคนิคแฟลชโฟโตกราฟี ตลอดจนนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของโมเดลเพื่อใช้สำหรับควบคุมระบบหยดของเหลวให้มีความแม่นยำ และการศึกษาลักษณะหยดของเหลวหลังจากหยดหนึ่งบนพื้นผิวภายใต้เงื่อนไขต่างๆ โดยใช้โปรแกรม surface evolver เพื่อจำลองการทำงาน

มีงานวิจัยหลายเรื่องที่ได้ทำการศึกษา และออกแบบการทดลองเพื่อควบคุมระบบหยดของเหลวให้มีความแม่นยำ โดยส่วนใหญ่สนใจที่จะควบคุมปริมาตรหยดด้วยการหาปริมาตรที่หยดออกมาด้วยวิธีการใดๆ ก็ตามเพื่อที่จะเป็นข้อมูลย้อนกลับไปเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายที่ต้องการแล้วทำการชดเชยผ่านตัวควบคุม แต่สาเหตุสำคัญที่ทำให้ปริมาตรหยดของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงคือ ระดับของเหลวที่เหลืออยู่ในกระบอกหยดเปลี่ยนไป โดย C.P.Chen และคณะ[11] ศึกษาอัตราการไหลของของเหลวในโมเดลที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรมจำลองการทำงานซึ่งค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการควบคุม คือค่า K และ N ในสมการ General Power Law ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ และชนิดของของเหลว แต่งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจากการทดลองโดยใช้ระบบการถ่ายภาพ

ในอดีตที่ผ่านมา มีผู้ที่สนใจศึกษาลักษณะของหยดของเหลวบนพื้นผิวโดยใช้โปรแกรม surface evolver เป็นจำนวนมาก เช่นการศึกษาถึงสาเหตุที่มีส่งผลต่อการเกิดโซลเดอ์บริดจ์ของการบัดกรีอุปกรณ์ เช่นเดียวกับงานวิจัยที่ได้นำเสนอพื้นฐานของหยดของเหลวบนพื้นผิว และยกตัวอย่างการนำไปใช้เพื่อหาค่าของตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดโซลเดอ์บริดจ์ระหว่างสไลเดอร์และซัสเพนชันในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ และได้ทำการ validate(เปรียบเทียบ) ระหว่างลักษณะการเกิดโซลเดอ์บริดจ์ที่ได้จากโปรแกรม surface evolver และที่เกิดขึ้นจริงมีความแตกต่างกันมากหรือน้อยเท่าใด เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ใช้นั้นมีความเหมาะสมกับการใช้วิเคราะห์ที่ได้จริงหรือไม่

ผลการทดลองกรณีศึกษาที่ศึกษาลักษณะของหยดของเหลวบนพื้นผิวโดยการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียก ปริมาตรและแรงตึงผิวของหยดของเหลว พบว่าแรงตึงผิวมีผลกระทบน้อยมาก ในขณะที่

ปริมาตรจะมีผลในเรื่องของสเกลที่เพิ่มขึ้นเท่านั้น และมุมเปียกจะมีผลต่อความสามารถในการเกาะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวของหยดของเหลวโดยมุมเปียกที่มีค่ามาก(135° ในการทดลอง) เปรียบเสมือนกับพื้นผิวมีลักษณะลื่น เป็นมันจึงทำให้หยดของเหลวเกาะอยู่บนพื้นผิวได้ไม่ดีซึ่งตรงข้ามกับกรณีที่มีมุมเปียกมีค่าน้อย นอกจากนี้ ผลการจำลองจากโปรแกรม กรณีที่มีมุมเท่ากับ 90° มีลักษณะใกล้เคียงกับผลจากการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพหยดน้ำที่เสถียรอยู่บนพื้น(ค่ามุมเปียก $\approx 80^\circ$) ดังนั้นการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมให้กับโปรแกรม จะทำให้โปรแกรมสามารถจำลองลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก สำหรับการนำโปรแกรมไปใช้วิเคราะห์หาปริมาตรของหยดตะกั่วที่ทำให้เกิดโซเดอริบรีดจ์ที่ค่ามุมเปียกนั้นๆ ผลปรากฏว่า เมื่อค่ามุมเปียกเพิ่มขึ้นค่าปริมาตรตะกั่วกลับลดลง ซึ่งหมายถึง สามารถเกิดโซเดอริบรีดจ์ได้โดยง่าย เนื่องจากหยดตะกั่วไม่สามารถเกาะอยู่บนพื้นผิวได้ตมามากนักจึงทำให้ไหลออกไปแล้วเกิดโซเดอริบรีดจ์กับ pad ทางด้านข้าง เรียกค่าปริมาตรของตะกั่วที่ทำให้เกิดโซเดอริบรีดจ์นี้ว่า “ปริมาตรวิกฤต” ดังนั้นเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดโซเดอริบรีดจ์ จึงควรใช้ค่าปริมาตรตะกั่วที่น้อยกว่าที่ปริมาตรวิกฤต นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกบนพื้นผิวสไลเดอร์และซัสเพนชันยังมีค่าปริมาตรวิกฤตใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเปียกเฉพาะบนซัสเพนชัน เพราะ โครงสร้างของสไลเดอร์มีพื้นที่มากกว่าซัสเพนชันจึงทำให้ตะกั่วสามารถเกาะอยู่บนพื้นผิวได้มากกว่าและเป็นสาเหตุให้เส้นกราฟในผลการทดลองต่างไปจากอีก 2 กรณี ค่าแรงดึงผิวของตะกั่วที่เพิ่มขึ้นทำให้พลังงานระหว่างพื้นผิวและหยดตะกั่วเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ตะกั่วสามารถยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวได้ดี

ผลการเปรียบเทียบระหว่างโมเดลจำลอง และโซลเดอริบรีดจ์ที่เกิดขึ้นจริงจากค่า %error แสดงให้เห็นว่า โมเดลที่ใช้สอดคล้องและสามารถวิเคราะห์ได้จริงกับการเกิดโซลเดอริบรีดจ์ในกรณีภาพที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคปภาพที่ 2-5(cross_section img1-V) แต่ไม่สามารถนำไปใช้ในกรณีการเกิดโซลเดอริบรีดจ์ที่มีลักษณะ cross_section img1 ได้ ดังนั้นเพื่อจะให้ได้สามารถศึกษาลักษณะการเกิดโซลเดอริบรีดจ์ได้ในทุกกรณี(ดังรูป cross_section img1-V) อาจจำเป็นต้องมีการสร้างโมเดลที่เหมาะสมขึ้นมาใหม่สำหรับกรณีที่ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่

การบันทึกภาพด้วยเทคนิคแฟลชไฟโตกราฟีสามารถใช้ศึกษา และวัดพฤติกรรมเชิงพลวัตของหยดของเหลวได้ โดยมีหลักสำคัญของการทำงานคือ เวลาที่จะต้องสอดคล้องกันระหว่างการปล่อยแสงแฟลชและการถ่ายภาพโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการทำงาน ในการทดลองนี้ได้ศึกษาโดยใช้หยดน้ำ พบว่าหลังจากหยดน้ำตกกระทบพื้นมีลักษณะเป็นคลื่นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ค่าการขยายตัวของหยดน้ำบนพื้นผิวที่เวลาใดๆ วัดด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโดยที่กราฟนั้นจะเพิ่มขึ้นและคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความสูงและมุมเปียกของหยดน้ำลดลงอย่างมากและต่อเนื่องในช่วงแรกของกราฟแล้วเริ่มคงที่ ค่ามุมเปียกระหว่างหยดน้ำและแผ่น PCB นี้มีค่าประมาณ 80° แสดงว่าหยดน้ำยังสามารถยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวดังกล่าวได้ซึ่งค่ามุมเปียกนี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะระหว่างหยดของเหลวและพื้นผิวใดๆ

ในตอนสุดท้ายของการศึกษาอัตราการไหลของหยดของเหลวเพื่อนำไปสู่การหาค่าพารามิเตอร์ $K_0 - K_3$ และ N ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการคำนวณอัตราการไหลเพื่อที่จะควบคุมระบบหยดของเหลวให้มีขนาดหยดคงที่ โดยได้ประยุกต์ใช้วิธีแฟลชโฟโตกราฟีเพื่อหาอัตราการไหลของหยดของเหลวที่ระดับต่างๆ พร้อมกับวัดค่าแรงดันในกระบอกหยดขณะนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหล (Q) และแรงดัน (P) ที่เวลาใดๆ สำหรับสมการอัตราการไหลของเหลวประเภท non-Newtonian fluid นั้นอธิบายได้ด้วยสมการ General Power-law ค่าพารามิเตอร์ N และ K ต่างๆ ที่ได้จากสัมประสิทธิ์ของสมการที่ของเหลวระดับต่างๆ ภายในกระบอกจะมีค่าลดลงเมื่อระดับของเหลวเพิ่มขึ้น โดยค่า n (power-law index; $n = 1/N$ และ $n < 1$) ที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำหวานมีคุณสมบัติของ pseudoplastic หรือ shear-thinning fluid สำหรับของเหลวประเภท Newtonian fluid ใช้สมการ Newtonian ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและแรงดัน จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ K ใดๆ และ N นั้นเปลี่ยนแปลงตามระดับของเหลวที่ไหลในกระบอก ดังนั้นในการควบคุมปริมาตรหยดของเหลวให้คงที่จะต้องคำนึงถึงระดับของเหลวที่ไหลอยู่ และชนิดของของเหลวที่ใช้

ในส่วน of ข้อเสนอนี้ โปรแกรม surface evolver สามารถใช้ศึกษาลักษณะของพื้นผิวที่สนใจภายใต้แรงที่กำหนดได้แต่ยังคงมีข้อจำกัดเรื่องของการไหลในกรณีที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิจึงโปรแกรมยังไม่สามารถพิจารณาผลดังกล่าวได้ ดังกรณีตัวอย่างที่ศึกษาการเกิดโซลเดอ์บริดจ์ระหว่างสไลเดอร์ และซัสเพนชันในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ที่จะต้องทำการสร้างโมเดลเริ่มต้นให้บอล(แทนตะกั่ว 2 ตำแหน่ง) ติดกันตั้งแต่ตอนเริ่ม ทำให้เป็นการเพิ่มภาระงานในการที่จะต้องคิดหาเงื่อนไขตัดสินกรณีใดเรียกว่าเกิด โซลเดอ์บริดจ์ ดังนั้นจากกรณีตัวอย่างนี้จึงน่าสนใจสำหรับการนำไปศึกษาต่อการหาวิธีเพื่อให้โปรแกรมสามารถนำเอาไปใช้พิจารณาผลของอุณหภูมิได้ด้วย หรืออาจจะเป็นการปรับปรุงเงื่อนไขหรือวิธีการพิจารณาว่าเกิดโซลเดอ์บริดจ์เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตด้วยเทคนิคแฟลชโฟโตกราฟี เป็นวิธีที่ประหยัด และใช้ศึกษาได้จริง ในตอนสุดท้ายของการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ได้ยกตัวอย่างการนำเทคนิคแฟลชโฟโตกราฟีนี้ไปหาค่าพารามิเตอร์ของของเหลวด้วยการหยดของเหลวซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวก แต่จำเป็นที่จะต้องใช้สมการให้ถูกต้องกับประเภทของของเหลวที่ใช้ เพื่อที่จะหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในแต่ละระดับของเหลวค่าต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] solder ball size, WD internal report.
- [2] <http://www.myfirstbrain.com>
- [3] <http://www.ramehart.com>
- [4] http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_9_2549_viscosity.pdf
- [5] R.P.King, "Introduction to Practical Fluid Flow" 1st edn, Butterworth-Heinemann, UK.
- [6] http://pirun.ku.ac.th/~g4765306/fluid_mech/viscosity_behavior.htm
- [7] <http://www.susqu.edu/brakke/evolver/workshop/html/day2.htm>
- [8] <http://www.susqu.edu/brakke/aux/downloads/manual230.pdf>
- [9] Ling Ming Yu, Bang Hun Sur and Kim Young Pyo, "Simulation Analysis on Factors Influencing Solder Joint Bridging of Fine Pitch Device" Journal of Electronic Packaging., (2004)vol.126, pp 22-25
- [10] D.Attinger, Z.Zhao and D.Poulikakos, "An Experimental Study of Molten Microdroplet Surface Deposition and Solidification: Transient Behavior and Wetting Angle Dynamics" Transaction of the ASME,(2000) 122, 544-556
- [11] H. X. Li, J. Liu, C. P. Chen, and H. Deng "A Simple Model-Based Approach for Fluid Dispensing Analysis and Control" IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, (2007) 12,pp 491- 503.
- [12] K.Thurow, T Kruger and N. Stoll, " An optical approach for the determination of droplet volumns in nanodispensing" J. Auto. Meth. Man. In Chem, (2009), 1-10.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
Source code ของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Script file(mound.fe) ของโปรแกรม surface evolver สำหรับศึกษาลักษณะหยดของเหลวบน
พื้นผิว

```
// mound.fe
// Evolver data for drop of prescribed volume sitting on plane with gravity.
// Contact angle with plane can be varied.
    parameter ANGLE = 90 // interior angle between plane and surface, degrees
    gravity_constant 0 // start with gravity off
//Materials Parameters
    parameter GAMLV = 0.072 // Liquid-vapor surface energy of solder (N/m^2)
    parameter den= 1.6e-10 // Density of water (Kg/ml^3)
#define wall (-cos(ANGLE*pi/180)) // virtual tension of facet on plane
constraint 1 /* the table top */
formula: x3 = 0
energy: // for contact angle
e1: -(wall*y)
e2: 0
e3: 0
vertices
1 0.0 0.0 0.0 constraint 1 /* 4 vertices on plane */
2 1.0 0.0 0.0 constraint 1
3 1.0 1.0 0.0 constraint 1
4 0.0 1.0 0.0 constraint 1
5 0.0 0.0 1.0
6 1.0 0.0 1.0
7 1.0 1.0 1.0
8 0.0 1.0 1.0
9 2.0 2.0 0.0 fixed /* for table top */
10 2.0 -1.0 0.0 fixed
11 -1.0 -1.0 0.0 fixed
12 -1.0 2.0 0.0 fixed
edges /* given by endpoints and attribute */
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

1 1 2  constraint 1 /* 4 edges on plane */
2 2 3  constraint 1
3 3 4  constraint 1
4 4 1  constraint 1
5 5 6
6 6 7
7 7 8
8 8 5
9 1 5
10 2 6
11 3 7
12 4 8
13 9 10 no_refine fixed /* for table top */
14 10 11 no_refine fixed
15 11 12 no_refine fixed
16 12 9  no_refine fixed
faces /* given by oriented edge loop */
1 1 10 -5 -9
2 2 11 -6 -10
3 3 12 -7 -11
4 4 9 -8 -12
5 5 6 7 8
7 13 14 15 16 no_refine density 0 fixed /* table top for display */
bodies /* one body, defined by its oriented faces */
1 1 2 3 4 5 VOLUME 1 density den

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Script file(solder bridge.fe) ของโปรแกรม surface evolver สำหรับศึกษาการเกิดโซเดออร์บริดจ์

```

parameter wet_angle = 15 // interior angle between plane and surface, degrees
parameter vwet_angle = 20
parameter dry_angle = 90 //sus // interior angle outside strip
parameter vdry_angle = 90
parameter solderwet_rightangle = 90
parameter solderwet_leftangle = 90
parameter bridge_angle = 90
parameter rot_angle = 45
parameter minus_rotangle_rightplan = -45
parameter minus_rotangle_leftplan = -135
parameter xleft = 0.01 // left side of wettable strip
parameter xright = 0.05399999 // right side of wettable strip
parameter vxleft = 0
parameter vxright = 0.06399999
parameter vxleft1 = -0.00549981
parameter vxright1 = 0.06950019
parameter vxright_sus = 0.06449999
parameter dong = 0.10720019
parameter xleft2 = 0.12290014
parameter xright2 = 0.16690016
parameter vxleft2 = 0.11290014
parameter vxright2 = 0.17690016
parameter vxleft_edge = 0.10720019
parameter vxright_edge = 0.18220019
parameter vxleft_sus = 0.11240002
parameter vyleft_slider = -0.047989865
parameter vyrigh_sus = 0.047989865
//Materials Parameters
parameter gamlv = 0.45 // Liquid-vapor surface energy of solder (Kg/s^2)
parameter gamlv_bridge = 0.45

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

parameter den= 1.3e-10 // Density of solder (Kg/mil^3)
parameter mr_grav= 385000 // Acceleration of gravity (mil/s^2)
gravity_constant mr_grav

#define WETT (-gamlv*cos(wet_angle*pi/180)) // virtual tension of facet on
#define DRYT (-gamlv*cos(dry_angle*pi/180)) // virtual tension of facet on
#define VWETT (-gamlv*cos(vwet_angle*pi/180)) // vertical surface tension
#define VDRYT (-gamlv*cos(vdry_angle*pi/180)) // vertical dry
#define solderwet_right (-gamlv*cos(solderwet_rightangle*pi/180))
#define solderwet_left (-gamlv*cos(solderwet_leftangle*pi/180))
#define bridge (-gamlv_bridge*cos(bridge_angle*pi/180))
// #define A cos(rot_angle*pi/180)
#define B tan(bridge_angle*pi/180)
#define C tan(rot_angle*pi/180)
#define D tan(minus_rotangle_rightplan*pi/180)
#define E tan(minus_rotangle_leftplan*pi/180)

constraint 1 /* the table top */
formula: z = y*C
energy: // For contact angle. Note that conditional expression is just
// the two tensions because dx strips each have constant tension!!!!
e1: -WETT*y
e2: 0
e3: 0

constraint 2 //vertical panel
formula: z = -y*C
energy:
e1: VWETT*z
e2: 0
e3: 0

constraint 3 //vertical panel
formula: z = -y*C

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

energy:

e1: $(x > x_{\text{left}} \text{ and } x < x_{\text{right}}) ? V_{\text{WETT}}*y : V_{\text{DRYT}}*y$

e2: 0

e3: 0

constraint 4 //solder right_plan

formula: $z = (y*D)+0.01835929$

energy:

e1: $-solderwet_right*z$

e2: 0

e3: 0

constraint 5 //solder left_plan

formula: $z = (y*E)+0.00711842$

energy:

e1: $-solderwet_left*z$

e2: 0

e3: 0

constraint 6

formula: $y = -0.004052885$

constraint 7 /* the table top */

formula: $z = y*C$

energy: // For contact angle. Note that conditional expression is just

// the two tensions because dx strips each have constant tension!!!!

e1: $-DRYT*y$

e2: 0

e3: 0

constraint 8 //vertical panel

formula: $z = -y*C$

energy:

e1: $-V_{\text{DRYT}}*y$

e2: 0

e3: 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

constraint 9 //vertical panel
formula: (y < 0)? (x = 0.06850019): (x = 0.06399999)
energy:
    e1: 0
    e2: -bridge*z
    e3: 0
// one-sided constraints keeping stuff inside wettable strip
constraint leftcon nonnegative
formula: x - xleft
constraint rightcon nonpositive
formula: x - xright
// one-sided constraints keeping stuff outside wettable strip
constraint outleft nonnegative
formula: x - vxleft1
constraint outleft2 nonpositive
formula: x - vxleft1
constraint outleft3 nonpositive
formula: x - dong
constraint outright nonpositive
formula: x - vxright1
constraint outright_slider1 nonnegative
formula: x - vxright1
constraint outright_sus nonpositive
formula: x - vxright_sus
// constraints for keeping certain vertices exactly on edge of wettable strip
constraint leftedge
formula: x = xleft
constraint rightedge
formula: x = xright
// one-sided constraints keeping stuff inside wettable strip
constraint vleftcon nonnegative
formula: x - vxleft

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

constraint vrightcon nonpositive
formula: x - vxright
// one-sided constraints keeping stuff outside wettable strip
constraint voutleft nonnegative
formula: x - vxleft
constraint voutleft_1 nonpositive
formula: x - vxleft
constraint voutright nonpositive
formula: x - vxright
// constraints for keeping certain vertices exactly on edge of wettable strip
constraint vleftedge
formula: x = Vxleft
constraint vrightedge
formula: x = Vxright
//one-side constraint:2
// one-sided constraints keeping stuff inside wettable strip
constraint leftcon2 nonnegative
formula: x - xleft2
constraint rightcon2 nonpositive
formula: x - xright2
// one-sided constraints keeping stuff outside wettable strip
constraint outleft2_1 nonnegative
formula: x - vxleft_edge
constraint outleft2_2 nonpositive
formula: x - vxleft_edge
constraint outright2 nonpositive
formula: x - vxright_edge
constraint outright3 nonnegative
formula: x - vxright_edge
// constraints for keeping certain vertices exactly on edge of wettable strip
constraint leftedge2
formula: x = xleft2

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

constraint righedge2
formula: x = xright2
// one-sided constraints keeping stuff inside wettable strip
constraint vleftcon2 nonnegative
formula: x - vxleft2
constraint vrightcon2 nonpositive
formula: x - vxright2
// one-sided constraints keeping stuff outside wettable strip
constraint voutleft2 nonnegative
formula: x - vxleft2
constraint vouright2 nonpositive
formula: x - vxright2
// constraints for keeping certain vertices exactly on edge of wettable strip
constraint vleftedge2
formula: x = Vxleft2
constraint vrightedge2
formula: x = Vxright2
constraint slider_left nonnegative
formula: y - vyleft_slider
constraint sus_right nonpositive
formula: y - vyright_sus
constraint outleft_sus nonnegative
formula: x - vxleft_sus
constraint circle
formula: (x-0.06399999)^2 + (y+0.0046193)^2 = (0.003*B)^2

```

vertices

1	0.06450004	0.024053955	0.014305295	fixed
2	0.06450004	0.019117215	0.019242035	fixed
3	0.06450024	0.061617247	0.061742067	fixed
4	0.06450024	0.066553987	0.056805327	fixed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5	0.04450004	0.014053975	0.004305315	fixed
6	0.06449999	0.014053975	0.004305315	fixed
//7	0.06450004	0.022341745	0.015764465	fixed
8	0.06449999	0.009179645	0.009179645	fixed
9	0.04450004	0.009179645	0.009179645	fixed
10	0.01950004	0.014053975	0.004305315	fixed
11	0.01950004	0.009179645	0.009179645	fixed
12	-0.00049996	0.024053955	0.014305295	fixed
13	-0.0005	0.014053975	0.004305315	fixed
14	-0.0005	0.009179645	0.009179645	fixed
15	-0.00049996	0.019179625	0.019179625	fixed
16	-0.00049979	0.059026105	0.059026105	fixed
17	-0.00049979	0.063900435	0.054151775	fixed
18	0.02196256	0.07864698	0.06889832	fixed
19	0.02196256	0.07371024	0.07383506	fixed
//20	0.03608816	0.06585268	0.07592516	fixed
21	0.03608816	0.07082651	0.07095133	fixed
22	0.02781757	0.07082651	0.07095133	fixed
23	0.02781757	0.07576325	0.06601459	fixed
24	0.03608816	0.07576325	0.06601459	fixed
25	0.04450024	0.07576325	0.06601459	fixed
26	0.04450024	0.07082651	0.07095133	fixed
27	0.06450029	0.07576325	0.06601459	fixed
28	0.06450029	0.07082651	0.07095133	fixed
//29	0.06450024	0.051835285	0.06860986	fixed
30	-0.00637418	0.071683055	0.061934395	fixed
31	-0.00637418	0.066808725	0.066808725	fixed
32	-0.00049977	0.06391545	0.06391545	fixed
//33	-0.00049979	0.05656056	0.06307735	fixed
34	-0.00049977	0.06878978	0.05904112	fixed
//35	0.02781757	0.06585268	0.07592516	fixed //suspension pad
36	-0.00549981	-0.01343269	0.01343269	fixed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

37	-0.00549981	-0.00355921	0.00355921	fixed
38	0.01450019	-0.00355921	0.00355921	fixed
39	0.01450019	-0.00355921	0.00355921	fixed
40	0.06950019	-0.00355921	0.00355921	fixed
41	0.06950019	-0.01343269	0.01343269	fixed
42	-0.00549981	-0.01392636	0.01293902	fixed
43	0.01450019	-0.004052885	0.003065535	fixed
//44	0.01450019	-0.004052885	0.003065535	fixed
45	-0.00549981	-0.00405288	0.00306554	fixed
46	0.04950019	-0.00405288	0.00306554	fixed
47	0.06950019	-0.01392636	0.01293902	fixed
48	0.06950019	-0.00405288	0.00306554	fixed
//49	0.04950019	-0.00405288	0.00306554	fixed
50	0.06950019	-0.038116385	0.038116385	fixed
51	0.06950019	-0.047989865	0.047989865	fixed
52	0.06950019	-0.047989865	0.047989865	fixed
53	0.01450019	-0.047989865	0.047989865	fixed
54	-0.00549981	-0.047989865	0.047989865	fixed
55	-0.00549981	-0.038116385	0.038116385	fixed
56	0.04950019	-0.048483535	0.047496195	fixed
57	0.06950019	-0.048483535	0.047496195	fixed
58	0.06950019	-0.038610055	0.037622715	fixed
59	0.01450019	-0.048483535	0.047496195	fixed
60	-0.00549981	-0.038610055	0.037622715	fixed
61	-0.00549981	-0.048483535	0.047496195	//slider pad
//62	0	0	0	//constraint 1,2 ,outleft
//63	0.06399999	0	0	//constraint 1,2 ,//outright
64	0.06399999	0.025	0.025	constraint
				1,9,outright_sus//sus_right//,voutright//,outright
65	0	0.049	0.049	constraint 1 ,voutleft,//sus_right//,outleft
66	-0.00549981	-0.044	0.044	constraint 2 ,outleft,slider_left
67	0.06950019	-0.020	0.020	constraint 2,9,outright,slider_left

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

69  0    0    0.064                                //solder ball
70  -0.05549981 -0.048483535 0.047496195 fixed
71  0.23220019 -0.048483535 0.047496195 fixed
72  0.23220019  0.00438066  -0.005368    fixed
73  -0.05549981 0.00438066  -0.005368    fixed
74  0.23220019  0.07864698  0.06889832  fixed
75  -0.05549981 0.07864698  0.06889832  fixed //top&bottom plate
76  0.005 -0.044 0.044                            constraint 2 ,slider_left
77  0.05899999 -0.044 0.044                        constraint 2 ,slider_left
//78 0.005 0 0 //constraint 1,2 ,leftedge
//79 0.05899999 0 0 //constraint 1,2 ,rightedge
80  0.005 0.049 0.049                            constraint 1 //,vleftedge//,leftedge
81  0.05899999 -0.049 0.049                      constraint 1 //,vrightedge//,rightedge
//solder ball edge conditions
82  -0.00549981 -0.00355921 0.00355921 constraint 2,5,outleft2
83  0.005 -0.00355921 0.00355921 constraint 2,5
84  0.05899999 -0.00355921 0.00355921 constraint 2,5
85  0.06950019 -0.00355921 0.00355921 constraint 2,5,9,outright
86  0 0.009179645 0.009179645 constraint 1,4,voutleft
87  0.005 0.009179645 0.009179645 constraint 1,4//,vleftedge
88  0.05899999 0.009179645 0.009179645 constraint 1,4//,vrightedge
89  0.06399999 0.009179645 0.009179645constraint
1,4,9,outright_sus//,voutright
90  -0.00549981 -0.004052885 0.003065535 constraint 5,6
91  0.005 -0.004052885 0.003065535 constraint 5,6
92  0.05899999 -0.004052885 0.003065535 constraint 5,6
93  0.06950019 -0.004052885 0.003065535 constraint 5,6,9,outright
94  0 0.014053975 0.004305315 constraint 4
95  0.005 0.014053975 0.004305315 constraint 4
96  0.05899999 0.014053975 0.004305315 constraint 4

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

97	0.06399999	0.014053975	0.004305315	constraint
4,9,outright_sus//,voutright				
98	-0.00549981	0.00438066	-0.005368	
99	0.06950019	0.00438066	-0.005368	constraint 9
//copy pad				
100	0.17740006	0.024053955	0.014305295	fixed
101	0.17740006	0.019117215	0.019242035	fixed
102	0.17740026	0.061617247	0.061742067	fixed
103	0.17740026	0.066553987	0.056805327	fixed
104	0.15740006	0.014053975	0.004305315	fixed
105	0.17740001	0.014053975	0.004305315	fixed
106	0.17740001	0.009179645	0.009179645	fixed
107	0.15740006	0.009179645	0.009179645	fixed
108	0.13240006	0.014053975	0.004305315	fixed
109	0.13240006	0.009179645	0.009179645	fixed
110	0.11240006	0.024053955	0.014305295	fixed
111	0.11240002	0.014053975	0.004305315	fixed
112	0.11240002	0.009179645	0.009179645	fixed
113	0.11240006	0.019179625	0.019179625	fixed
114	0.11240023	0.059026105	0.059026105	fixed
115	0.11240023	0.063900435	0.054151775	fixed
116	0.13486258	0.07864698	0.06889832	fixed
117	0.13486258	0.07371024	0.07383506	fixed
118	0.14898818	0.07082651	0.07095133	fixed
119	0.14071759	0.07082651	0.07095133	fixed
120	0.14071759	0.07576325	0.06601459	fixed
121	0.14898818	0.07576325	0.06601459	fixed
122	0.15740026	0.07576325	0.06601459	fixed
123	0.15740026	0.07082651	0.07095133	fixed
124	0.17740031	0.07576325	0.06601459	fixed
125	0.17740031	0.07082651	0.07095133	fixed
126	0.10652584	0.071683055	0.061934395	fixed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

127	0.10652584	0.066808725	0.066808725	fixed
128	0.11240025	0.06391545	0.06391545	fixed
129	0.11240025	0.06878978	0.05904112	fixed//suspension pad
130	0.10720019	-0.01343269	0.01343269	fixed
131	0.10720019	-0.00355921	0.00355921	fixed
132	0.12720019	-0.00355921	0.00355921	fixed
133	0.12720019	-0.00355921	0.00355921	fixed
134	0.18220019	-0.00355921	0.00355921	fixed
135	0.18220019	-0.01343269	0.01343269	fixed
136	0.10720019	-0.01392636	0.01293902	fixed
137	0.12720019	-0.004052885	0.003065535	fixed
138	0.10720019	-0.00405288	0.00306554	fixed
139	0.16220019	-0.00405288	0.00306554	fixed
140	0.18220019	-0.01392636	0.01293902	fixed
141	0.18220019	-0.00405288	0.00306554	fixed
142	0.18220019	-0.038116385	0.038116385	fixed
143	0.18220019	-0.047989865	0.047989865	fixed
144	0.18220019	-0.047989865	0.047989865	fixed
145	0.12720019	-0.047989865	0.047989865	fixed
146	0.10720019	-0.047989865	0.047989865	fixed
147	0.10720019	-0.038116385	0.038116385	fixed
148	0.16220019	-0.048483535	0.047496195	fixed
149	0.18220019	-0.048483535	0.047496195	fixed
150	0.18220019	-0.038610055	0.037622715	fixed
151	0.12720019	-0.048483535	0.047496195	fixed
152	0.10720019	-0.038610055	0.037622715	fixed
153	0.10720019	-0.048483535	0.047496195	fixed//slider pad
154	0.17690016	0.049	0.049	constraint 7 ,voutright2//,outright
155	0.11290014	0.049	0.049	constraint 7 ,outleft_sus//voutleft2//,outleft
156	0.11290014	-0.044	0.044	constraint 8 ,outleft2_1,slider_left

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

157 0.18220019 -0.044 0.044 constraint 8 ,outright2,slider_left
158 0.17690016 0 0.064
159 0.11290014 0 0.064 //solder ball

160 0.11790014 -0.044 0.044 constraint 8 ,slider_left
161 0.17190016 -0.044 0.044 constraint 8 ,slider_left
162 0.11790014 0.049 0.049 constraint 7 //,vleftedge2//,leftedge
163 0.17190016 0.049 0.049 constraint 7 //,vrightedge2//,rightedge

```

```
//solder ball edge conditions
```

```

164 0.11290014 -0.00355921 0.00355921 constraint 8,5,outleft2_1//3
165 0.11790014 -0.00355921 0.00355921 constraint 8,5
166 0.17190016 -0.00355921 0.00355921 constraint 8,5
167 0.18220019 -0.00355921 0.00355921 constraint 8,5 ,outright3//2
168 0.11290014 0.009179645 0.009179645 constraint
7,4,outleft_sus//voutleft2
169 0.11790014 0.009179645 0.009179645 constraint 7,4//,vleftedge2
170 0.17190016 0.009179645 0.009179645 constraint 7,4//,vrightedge2
171 0.17690016 0.009179645 0.009179645 constraint 7,4,voutright2
172 0.11290014 -0.004052885 0.003065535 constraint 5,6
173 0.11790014 -0.004052885 0.003065535 constraint 5,6
174 0.17190016 -0.004052885 0.003065535 constraint 5,6
175 0.18220019 -0.004052885 0.003065535 constraint 5,6,outright2
176 0.11290014 0.014053975 0.004305315 constraint 4
177 0.11790014 0.014053975 0.004305315 constraint 4
178 0.17190016 0.014053975 0.004305315 constraint 4
179 0.17690016 0.014053975 0.004305315 constraint 4,voutright2
180 0.11290014 0.00438066 -0.005368
181 0.18220019 0.00438066 -0.005368
186 0.06899999 0.00438066 0.00048066 //constraint wall//,circle//
0.06399999 0.00438066
0.00688066

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

187  0.08550019  -0.0108      0.045 //constraint wall
188  0.09050019   0.0158  0.045      //constraint wall
189  0.06099999  -0.0006193  0.045 //constraint circle
//----- vertices -----//

```

edges

```

1 1 2      no_refine fixed
2 2 3      no_refine fixed
3 2 8      no_refine fixed
4 8 9      no_refine fixed
5 9 5      no_refine fixed
6 5 6      no_refine fixed
7 6 1      no_refine fixed
8 5 10     no_refine fixed
9 10 11    no_refine fixed
10 11 9     no_refine fixed
11 11 14   no_refine fixed
12 14 15   no_refine fixed
13 15 12   no_refine fixed
14 12 13   no_refine fixed
15 13 10   no_refine fixed
16 12 17   no_refine fixed
17 16 15   no_refine fixed
18 1 4     no_refine fixed //half_1
19 18 19   no_refine fixed
20 18 23   no_refine fixed
21 23 24   no_refine fixed
22 24 21   no_refine fixed
23 21 22   no_refine fixed
24 22 19   no_refine fixed
25 24 25   no_refine fixed

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26	25	26	no_refine	fixed
27	26	21	no_refine	fixed
28	26	28	no_refine	fixed
29	28	3	no_refine	fixed
30	4	27	no_refine	fixed
31	27	25	no_refine	fixed
32	3	4	no_refine	fixed
33	17	16	no_refine	fixed
34	30	31	no_refine	fixed
35	31	32	no_refine	fixed
36	32	16	no_refine	fixed
37	30	34	no_refine	fixed
38	34	17	no_refine	fixed //suspension
39	36	37	no_refine	fixed
40	37	38	no_refine	fixed
41	38	39	no_refine	fixed
42	39	40	no_refine	fixed
43	40	41	no_refine	fixed
44	41	47	no_refine	fixed
45	47	48	no_refine	fixed
46	48	46	no_refine	fixed
47	38	43	no_refine	fixed
48	43	46	no_refine	fixed
49	46	39	no_refine	fixed
50	43	45	no_refine	fixed
51	45	42	no_refine	fixed
52	42	36	no_refine	fixed
53	41	50	no_refine	fixed
54	50	51	no_refine	fixed
55	51	52	no_refine	fixed
56	52	53	no_refine	fixed
57	53	54	no_refine	fixed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

58 54 55    no_refine fixed
59 55 36    no_refine fixed
60 52 56    no_refine fixed
61 56 57    no_refine fixed
62 57 58    no_refine fixed
63 58 50    no_refine fixed
64 58 47    no_refine fixed
65 56 59    no_refine fixed
66 59 53    no_refine fixed
67 55 60    no_refine fixed
68 60 61    no_refine fixed
69 60 42    no_refine fixed
70 61 59    no_refine fixed
//71 62 78  // solder ball
//72 78 79
//73 79 63
///74 63 64  constraint 1 ,outright
75 64 81    constraint 1 ,voutright//,outright
76 81 80    constraint 1 //,vleftcon, vrightcon//,leftcon,rightcon
77 80 65    constraint 1 ,voutleft//,outleft
///78 65 62  constraint 1 ,//outleft
79 66 76    constraint 2 ,slider_left//outleft
80 76 77    constraint 2 ,slider_left
81 77 67    constraint 2 ,slider_left,outright
//82 67 68
//101 68 69
//102 69 66
///103 66 62  constraint 3 ,voutleft
///104 67 63  constraint 2 ,voutright
//105 68 64
//106 69 65

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

83 70 71    no_refine fixed          // top & bottom plate
84 71 72    no_refine fixed
85 72 73    no_refine fixed
86 73 70    no_refine fixed
87 72 74    no_refine fixed
88 74 75    no_refine fixed
89 75 73    no_refine fixed

90 54 61    no_refine fixed          //side edge slider
91 51 57    no_refine fixed
92 40 48    no_refine fixed
93 37 45    no_refine fixed

94 32 34    no_refine fixed          //side edge suspension
95 14 13    no_refine fixed
96 8 6      no_refine fixed
97 28 27    no_refine fixed
98 22 23    no_refine fixed
99 31 19    no_refine fixed
100 30 18   no_refine fixed

//107 63 85
108 85 84   constraint 2,5,outright
109 84 83   constraint 2,5
110 83 82   constraint 2,5 ,outleft
//111 82 62
112 67 85   constraint 2,9,outright
113 66 82   constraint 2,outleft,outleft2
//114 63 89
115 89 88   constraint 1,voutright
116 88 87   constraint 1//,vleftcon, vrightcon
117 87 86   constraint 1,voutleft

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//118 86 62
119 89 64 constraint 1,9,outright_sus //,voutright
120 86 65 constraint 1,voutleft_1
//101 76 77 //constraint 2
//102 78 79 constraint 1
//103 76 62
//104 77 63
//105 78 62
//106 79 63
121 90 91 constraint 5,6
122 91 92 constraint 5,6
123 92 93 constraint 5,6
124 93 85 constraint 5,9,outright
125 82 90 constraint 5
126 98 90
127 93 99 constraint 9
128 94 95 constraint 4
129 95 96 constraint 4
130 96 97 constraint 4
131 86 94 constraint 4
132 97 89 constraint 4,9,voutright
133 98 94
134 97 99 constraint 9
135 99 98
//copy pad
136 100 101 no_refine fixed
137 101 102 no_refine fixed
138 101 106 no_refine fixed
139 106 107 no_refine fixed
140 107 104 no_refine fixed
141 104 105 no_refine fixed
142 105 100 no_refine fixed

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

143	104	108	no_refine	fixed
144	108	109	no_refine	fixed
145	109	107	no_refine	fixed
146	109	112	no_refine	fixed
147	112	113	no_refine	fixed
148	113	110	no_refine	fixed
149	110	111	no_refine	fixed
150	111	108	no_refine	fixed
151	110	115	no_refine	fixed
152	114	113	no_refine	fixed
153	100	103	no_refine	fixed //half_1
154	116	117	no_refine	fixed
155	116	120	no_refine	fixed
156	120	121	no_refine	fixed
157	121	118	no_refine	fixed
158	118	119	no_refine	fixed
159	119	117	no_refine	fixed
160	121	122	no_refine	fixed
161	122	123	no_refine	fixed
162	123	118	no_refine	fixed
163	123	125	no_refine	fixed
164	125	102	no_refine	fixed
165	103	124	no_refine	fixed
166	124	122	no_refine	fixed
167	102	103	no_refine	fixed
168	115	114	no_refine	fixed
169	126	127	no_refine	fixed
170	127	128	no_refine	fixed
171	128	114	no_refine	fixed
172	126	129	no_refine	fixed
173	129	115	no_refine	fixed //suspension
174	130	131	no_refine	fixed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

175	131	132	no_refine	fixed	
176	132	133	no_refine	fixed	
177	133	134	no_refine	fixed	
178	134	135	no_refine	fixed	
179	135	140	no_refine	fixed	
180	140	141	no_refine	fixed	
181	141	139	no_refine	fixed	
182	132	137	no_refine	fixed	
183	137	139	no_refine	fixed	
184	139	133	no_refine	fixed	
185	137	138	no_refine	fixed	
186	138	136	no_refine	fixed	
187	136	130	no_refine	fixed	
188	135	142	no_refine	fixed	
189	142	143	no_refine	fixed	
190	143	144	no_refine	fixed	
191	144	145	no_refine	fixed	
192	145	146	no_refine	fixed	
193	146	147	no_refine	fixed	
194	147	130	no_refine	fixed	
195	144	148	no_refine	fixed	
196	148	149	no_refine	fixed	
197	149	150	no_refine	fixed	
198	150	142	no_refine	fixed	
199	150	140	no_refine	fixed	
200	148	151	no_refine	fixed	
201	151	145	no_refine	fixed	
202	147	152	no_refine	fixed	
203	152	153	no_refine	fixed	
204	152	136	no_refine	fixed	
205	153	151	no_refine	fixed	
206	146	153	no_refine	fixed	//side edge slider

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

207	143	149	no_refine	fixed			
208	134	141	no_refine	fixed			
209	131	138	no_refine	fixed			
210	128	129	no_refine	fixed	//side edge suspension		
211	112	111	no_refine	fixed			
212	106	105	no_refine	fixed			
213	125	124	no_refine	fixed			
214	119	120	no_refine	fixed			
215	127	117	no_refine	fixed			
216	126	116	no_refine	fixed			
217	154	163	constraint 7	,voutright2//	,outright		
218	163	162	constraint 7 //	,vleftcon2,	vrightcon2//	,leftcon	,rightcon
219	162	155	constraint 7	,voutleft2//	,outleft		
220	156	160	constraint 8	,outleft2_1	,slider_left		
221	160	161	constraint 8	,slider_left			
222	161	157	constraint 8	,outright2	,slider_left		
//223	157	158					
//224	158	159					
//225	159	156					
//226	158	154					
//227	159	155					
228	167	166	constraint 8,5	,outright2			
229	166	165	constraint 8,5				
230	165	164	constraint 8,5	,outleft2_1			
231	157	167	constraint 8	,outright2			
232	156	164	constraint 8	,outleft2_1	,outleft2_2		
233	171	170	constraint 7	,voutright2			
234	170	169	constraint 7//	,vleftcon2,	vrightcon2		
235	169	168	constraint 7	,voutleft2			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

236	171	154	constraint 7,voutright2
237	168	155	constraint 7,outleft_sus//voutleft2
238	172	173	constraint 5,6
239	173	174	constraint 5,6
240	174	175	constraint 5,6
241	175	167	constraint 5,outright2
242	164	172	constraint 5
243	180	172	
244	175	181	
245	176	177	constraint 4
246	177	178	constraint 4
247	178	179	constraint 4
248	168	176	constraint 4
249	179	171	constraint 4,voutright2
250	180	176	
251	179	181	
252	181	180	
//new solder ball edge			
261	66	65	
//262	67	64	//constraint 9
263	156	155	
264	157	154	
265	156	187	
266	155	188	
267	180	186	
271	186	99	//constraint wall
272	188	64	//constraint wall
273	187	67	//constraint wall
274	186	187	//constraint wall //,circle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

275 187 188 //constraint wall //,circle
276 188 186 //constraint wall //,circle
277 67 189 constraint 9//,plate_z
278 189 64 constraint 9//,plate_z

```

faces

```

1 70 66 57 90 no_refine density 0 fixed
2 68 -90 58 67 no_refine density 0 fixed
3 -65 -60 56 -66 no_refine density 0 fixed
4 61 -91 55 60 no_refine density 0 fixed
5 62 63 54 91 no_refine density 0 fixed
6 64 -44 53 -63 no_refine density 0 fixed
7 45 -92 43 44 no_refine density 0 fixed
8 46 49 42 92 no_refine density 0 fixed
9 -48 -47 41 -49 no_refine density 0 fixed
10 50 -93 40 47 no_refine density 0 fixed
11 51 52 39 93 no_refine density 0 fixed
12 -69 -67 59 -52 no_refine density 0 fixed //side slider
13 39 40 41 42 43 53 54 55 56 57 58 59 no_refine density 0 fixed
14 34 35 94 -37 no_refine density 0 fixed
15 36 -33 -38 -94 no_refine density 0 fixed
16 17 13 16 33 no_refine density 0 fixed
17 -12 95 -14 -13 no_refine density 0 fixed
18 -11 -9 -15 -95 no_refine density 0 fixed
19 10 5 8 9 no_refine density 0 fixed
20 -4 96 -6 -5 no_refine density 0 fixed
21 7 1 3 96 no_refine density 0 fixed
22 2 32 -18 1 no_refine density 0 fixed
23 -29 97 -30 -32 no_refine density 0 fixed
24 -28 -26 -31 -97 no_refine density 0 fixed
25 27 -22 25 26 no_refine density 0 fixed
26 23 98 21 22 no_refine density 0 fixed

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27 24 -19 20 -98 no_refine density 0 fixed
 28 35 36 17 -12 -11 10 -4 -3 2 -29 -28 27 23 24 -99 no_refine density 0 fixed
 29 34 99 -19 -100 no_refine density 0 fixed //suspension pad
 30 112 -124 127 -134 132 119 -278 -277 //dark blue (change the old one)
 33 261 -120 131 -133 126 -125 -113 //dark blue (change the old one)
 37 -126 -135 -127 -123 -122 -121 //pink_leftside (change the old one)
 38 133 128 129 130 134 135 //pink_bottom (change the old one)
 40 83 84 85 86 no_refine density 0 fixed //plate
 41 87 88 89 -85 no_refine density 0 fixed
 //copy pad face

 42 205 201 192 206 no_refine density 0 fixed
 43 203 -206 193 202 no_refine density 0 fixed
 44 -200 -195 191 -201 no_refine density 0 fixed
 45 196 -207 190 195 no_refine density 0 fixed
 46 197 198 189 207 no_refine density 0 fixed
 47 199 -179 188 -198 no_refine density 0 fixed
 48 180 -208 178 179 no_refine density 0 fixed
 49 181 184 177 208 no_refine density 0 fixed
 50 -183 -182 176 -184 no_refine density 0 fixed
 51 185 -209 175 182 no_refine density 0 fixed
 52 186 187 174 209 no_refine density 0 fixed
 53 -204 -202 194 -187 no_refine density 0 fixed //slider faces
 54 174 175 176 177 178 188 189 190 191 192 193
 194 no_refine density 0 fixed
 55 169 170 210 -172 no_refine density 0 fixed
 56 171 -168 -173 -210 no_refine density 0 fixed
 57 152 148 151 168 no_refine density 0 fixed
 58 -147 211 -149 -148 no_refine density 0 fixed
 59 -146 -144 -150 -211 no_refine density 0 fixed
 60 145 140 143 144 no_refine density 0 fixed
 61 -139 212 -141 -140 no_refine density 0 fixed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

62  142  136  138  212  no_refine density 0 fixed
63  137  167  -153  136  no_refine density 0 fixed
64  -164  213  -165  -167  no_refine density 0 fixed
65  -163  -161  -166  -213  no_refine density 0 fixed
66  162  -157  160  161  no_refine density 0 fixed
67  158  214  156  157  no_refine density 0 fixed
68  159  -154  155  -214  no_refine density 0 fixed
69  170 171      152 -147 -146 145 -139 -138 137 -164 -163 162 158 159 -215
    no_refine density 0 fixed
70  169  215  -154  -216  no_refine density 0 fixed    //suspension faces

71  231 -241 244 -251 249 236 -264 //dark blue (change the old one)
75  -243 -252 -244 -240 -239 -238 //pink_leftside (change the old one)
76  250 245 246 247 251 252 //pink_bottom (change the old one)

//new solder ball faces
86  79 80 81 277 278 75 76 77 -261
87  220 221 222 264 217 218 219 -263
91  263 266 -275 -265
92  275 272 -278 -277 -273
93  265 -274 -267 243 -242 -232
94  274 273 112 -124 127 -271
95  271 -134 132 119 -272 276
96  -276 -266 -237 248 -250 267

```

bodies

```

1  30 33 37 38 86          volume 0.000268 density den
2  71 75 76 87 91 92 93 94 95 96    volume 0.000268    density den

```

read

```
kik := {unset vertices where_on constraint 9;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

unset edges where_on constraint 9;
//unset edges where_on constraint wall;
unset faces where_on constraint 9;
g ; u; r; g5; u; V; r; g10;}

```

```

gogo := { g ; u; r; g5; u; V; r; g10; }

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Source code โปรแกรม Matlab

```

% การสเกลขนาด(surface evolver)
eg1 = imread('edge_eg1.jpg'); %imshow(eg1)
level = graythresh(eg1);
BWeg1 = im2bw(eg1,level);
RSeg1 = imresize(BWeg1,[336,285]);
xform = [ 1 0 0
          0 1 0
          7 26 1];
tform_translate = maketform('affine',xform)
[BWeg1_trans xdata ydata]= imtransform(RSeg1, tform_translate);
%imshow(BWeg1_trans)
BWeg1_trans2 = imtransform(RSeg1, tform_translate,...
    'XData',[1 (size(BWeg1,2)+xform(3,1))],...
    'YData',[1 (size(BWeg1,1)+xform(3,2))]);

```

```

% การหาจุด c.g. (surface evolver)
eg1 = imread('90.jpg');
level = graythresh(eg1);
BWeg1 = im2bw(eg1,level);
IV_BWeg1 = ~BWeg1;
FIV_BWeg1 = imfill(IV_BWeg1,'holes');
LFIV_BWeg1 = bwlabel(FIV_BWeg1);
s = regionprops(LFIV_BWeg1,'centroid');
imshow(FIV_BWeg1)
hold on
k=1;
for k =1:numel(s)
    plot(s(k).Centroid(1),s(k).Centroid(2),'g*')
end
hold off

% การย้ายตำแหน่งจุด c.g
eg1 = imread('edge_eg1.jpg'); %imshow(eg1)
level = graythresh(eg1);
BWeg1 = im2bw(eg1,level);
xform = [ 1 0 0
          0 1 0
          7 26 1];
tform_translate = maketform('affine',xform)
[BWeg1_trans xdata ydata]= imtransform(BWeg1, tform_translate);
imshow(BWeg1_trans)
[r,c] = find(BWeg1_trans==0);
A = [r,c];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%สำหรับการหาตำแหน่งของจุด D1 และ D2 ที่มุมอ้างอิง 0-360°(surface evolver)
RSeg5_R = imread('test1-1.jpg');
BWRSeg5_R = rgb2gray(RSeg5_R);
Eeg5_R = edge(BWRSeg5_R,'zerocross'); imshow(Eeg5_R)
K = bwlabel(Eeg5_R);
[r c] = find(K==4); %[r c];
B = size([r c])
B(1,1)
i=1;
j=1;
k=1;
l=1;
while i <= B(1,1)
    if r(i)<220 & c(i)>220
        R(i) = r(i);C(i) = c(i); angle(i) = (180*(atan((220-r(i))/(c(i)-220))))/pi;
    elseif r(i)<220 & c(i)<220
        R(i) = r(i);C(i) = c(i); angle(i) = 180 -((180*(atan((220-r(i))/(220-c(i))))))/pi;
    elseif r(i)>220 & c(i)<220
        R(i) = r(i);C(i) = c(i); angle(i) = 180 +((180*(atan((r(i)-220)/(220-c(i))))))/pi;
    elseif r(i)>220 & c(i)>220
        R(i) = r(i);C(i) = c(i); angle(i) = 360 -((180*(atan((r(i)-220)/(c(i)-220)))))/pi;
    else
        if r(i)==220 & c(i)>220
            R(i) = r(i);C(i) = c(i); angle(i) = 360;
        elseif r(i)<220 & c(i)==220
            R(i) = r(i);C(i) = c(i); angle(i) = 90;
        elseif r(i)==220 & c(i)<220
            R(i) = r(i);C(i) = c(i); angle(i) = 180;
        else
            R(i) = r(i);C(i) = c(i); angle(i) = 270;
        end
    end
end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    i=i+1;
end
RC = [R' C'];
ag = angle';
D = size(ag);
D(1,1)
while j<361
for k=1:D(1,1)
    if ag(k)>(j-0.5) & ag(k)<(j+0.5)
        A(k) = ag(k);
    else
        A(k) = 0;
    end
end
E = abs(A-j);
G = ag(find(E==min(E)));
if size(G)==1
    g(j) = G;
else
    g(j) = max(G);
end
j=j+1;
end
H =g';
for l=1:360
    l(l)= find(ag==H(l));
    L(l)= RC(l(l),1); M(l)=RC(l(l),2);
end
LM = [L' M'];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% การหาค่ามุมเป็ยก(การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของเหลว)

```
kik = imread('86.5.png');
kik2 = rgb2gray(kik);
K = bwlabel(kik2);
[r c] = find(K == 0);
y1 = min(r);
y2 = max(r);
x1 = c(find(r == min(r)));
x2 = c(find(r == max(r)));
if x2 > x1
    angle = (180*(atan((y2-y1)/(x2-x1))))/pi;
elseif x2 < x1
    angle = 180 - (180*(atan((y2-y1)/(x1-x2))))/pi;
else angle = 90;
end
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% การหาปริมาตรหยดของเหลว(ระบบหยดของเหลว)

```
kik = imread('500.png');
[r c] = find(kik == 255);
edge = [r c];
rmax = max(r);
rmin = min(r);
high = abs(rmax - rmin);
i = 0;
while i<high
    width = c(find(r==rmin + i));
    abswidth = abs(max(width) - min(width));
    area(i+1)= ((abswidth*5)/196)*((abswidth*5)/196);
    i = i+1;
end
trans_area = area;
imshow(kik)
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



THE PETROLEUM AND PETROCHEMICAL COLLEGE
CHULALONGKORN UNIVERSITY
SOI CHULA 12, PHVA THAI ROAD, BANGKOK 10330, THAILAND

THE RESEARCH AFFAIRS

PPCSDWI-06-203/001.4

ANALYTICAL / TESTING REPORT

Report no. 324/54

Sample owner :
Sample type :
Number of sample : 1
Instrument used : Brookfield / LVDV III (Temp 25 °C)
Date of receiving : August 17, 2011
Date of analysis : August 24, 2011
Result :

Sample	Spindle	Speed (rpm)	Viscosity (cP)
น้ำหวาน	27	250	199

Analyzed by :

(Mr. Suksan Putthakulanana)

Researcher

Approved by :

(Assoc. Prof. Dr. Pramoch Rangsunvigit)

Associate Dean for Research Affairs

N.B. The result is valid for sample analyzed only.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3

Hardware Overview

This chapter presents an overview of the hardware functions on your PCI/PXI-1411 board and explains the operation of each functional unit making up the PCI/PXI-1411.

Functional Overview

The PCI/PXI-1411 features a flexible, high-speed data path optimized for the acquisition and formatting of video data from analog monochrome and color cameras.

The block diagram in Figure 3-1 illustrates the key functional components of the PCI/PXI-1411.

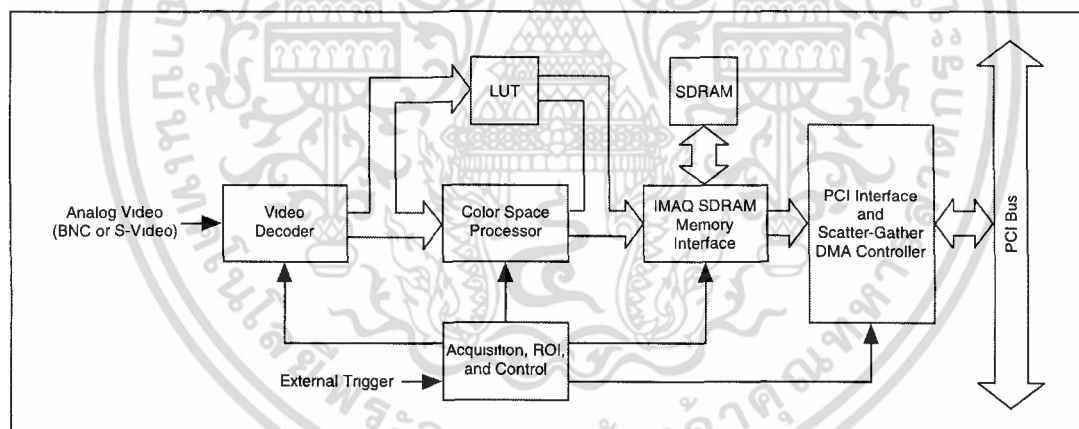


Figure 3-1. PCI/PXI-1411 Block Diagram

Video Acquisition

The PCI/PXI-1411 can acquire analog color video in a variety of modes and store the images in the onboard SDRAM memory or transfer the images directly to PCI system memory.

Video Decoder

The PCI/PXI-1411 supports NTSC and PAL video standards in either composite or S-Video format. The onboard video decoder converts the incoming video signal to Red, Green, and Blue (RGB) data and passes this data to the color-space processor for further processing.

The video decoder also allows you to control numerous parameters to optimize an acquisition. You can independently adjust parameters such as analog input range, brightness, contrast, saturation, or frequency range (controlled by different filters). See the Measurement & Automation Explorer online help for a complete description of the PCI/PXI-1411 video parameters.

Furthermore, the video decoder strips out all necessary clock and synchronization signals included in the video signal and controls the acquisition conditions automatically. High-quality circuitry regenerates even bad timing signals allowing acquisitions from, for example, a video cassette recorder (VCR).



Note The IMAQ PCI-1411 revision C, IMAQ PXI-1411 revision A, and all later revisions are factory calibrated to improve measurement accuracy and board-to-board consistency. Specifically, the luma gain and chroma gain have been calibrated. See Appendix A, *Specifications*, for accuracy specifications.

Color-Space Processor and LUTs

The color-space processor receives the RGB data from the video decoder and performs several different (optional) operations on the data before passing them to the memory controller. Processing functions include the following:

- Adjusting independent gain of the three signals (R, G, and B). You can use independent gain to perform, for example, white balancing on the acquired image.
- Applying three independent look-up tables (LUTs) to the R, G, and B data.
- Converting the RGB data into Hue, Saturation, and Luminance (HSL).
- Processing the hue plane to clear pixels where the saturation falls below a predefined threshold value. This function is called *post-decoding coring*. You can use this function to remove part of the image without color information (monochrome) that otherwise would introduce noise on the hue plane.

The color-space processor can export the video data in 32-bit RGB or HSL formats or in individual 8-bit hue, saturation, or luminance planes. For more information on these image types, see the *Image Representations* section in Appendix B, *Introduction to Color*.

SDRAM

The PCI/PXI-1411 comes with 16 MB of onboard high-speed synchronous dynamic RAM (SDRAM). The PCI/PXI-1411 can use the onboard RAM as a first-in first-out (FIFO) buffer, transferring the image data as it is acquired or acquiring the image data into SDRAM and holding it for later transfer to main memory.

Trigger Control and Mapping Circuitry

The trigger control monitors and drives the external trigger line. You can configure this line to start an acquisition on a rising or falling edge and drive the line asserted or unasserted, similar to a digital I/O line. You can also map many of the PCI/PXI-1411 status signals to this trigger line and program the trigger line in polarity and direction. For a list of mappable status signals, see Chapter 3, *Programming with NI-IMAQ*, of the *NI-IMAQ User Manual*.

Acquisition, Scaling, ROI

The acquisition, scaling, and region-of-interest (ROI) circuitry monitors the incoming video signals and routes the active pixels to the SDRAM memory. The PCI/PXI-1411 can perform ROI and scaling on all video lines and frames. Pixel and line scaling transfers certain multiples (two, four, or eight) of pixels and lines to onboard memory. In an ROI acquisition, you select an area within the acquisition window to transfer to the PCI bus.

Scatter-Gather DMA Controllers

The PCI/PXI-1411 uses three independent onboard direct memory access (DMA) controllers. The DMA controllers transfer data between the onboard SDRAM memory buffers and the PCI bus. Each of these controllers supports scatter-gather DMA, which allows the DMA controller to reconfigure on-the-fly. Thus, the PCI/PXI-1411 can perform continuous image transfers directly to either contiguous or fragmented memory buffers.

Bus Master PCI Interface

The PCI/PXI-1411 implements the PCI interface with a National Instruments custom application-specific integrated circuit (ASIC), the PCI MITE. The PCI interface can transfer data at a maximum rate of 132 Mbytes/s in bus master mode. The PCI/PXI-1411 can generate 8-, 16-, and 32-bit memory read and write cycles, both single and multiple. In slave mode, the PCI/PXI-1411 is a medium-speed decoder that accepts both memory and configuration cycles. The interface logic ensures that the PCI/PXI-1411 can meet PCI loading, driving, and timing requirements.

Board Configuration NVRAM

The PCI/PXI-1411 contains onboard nonvolatile RAM (NVRAM) that configures all registers on power-up.

Start Conditions

The PCI/PXI-1411 can start acquisitions in a variety of conditions:

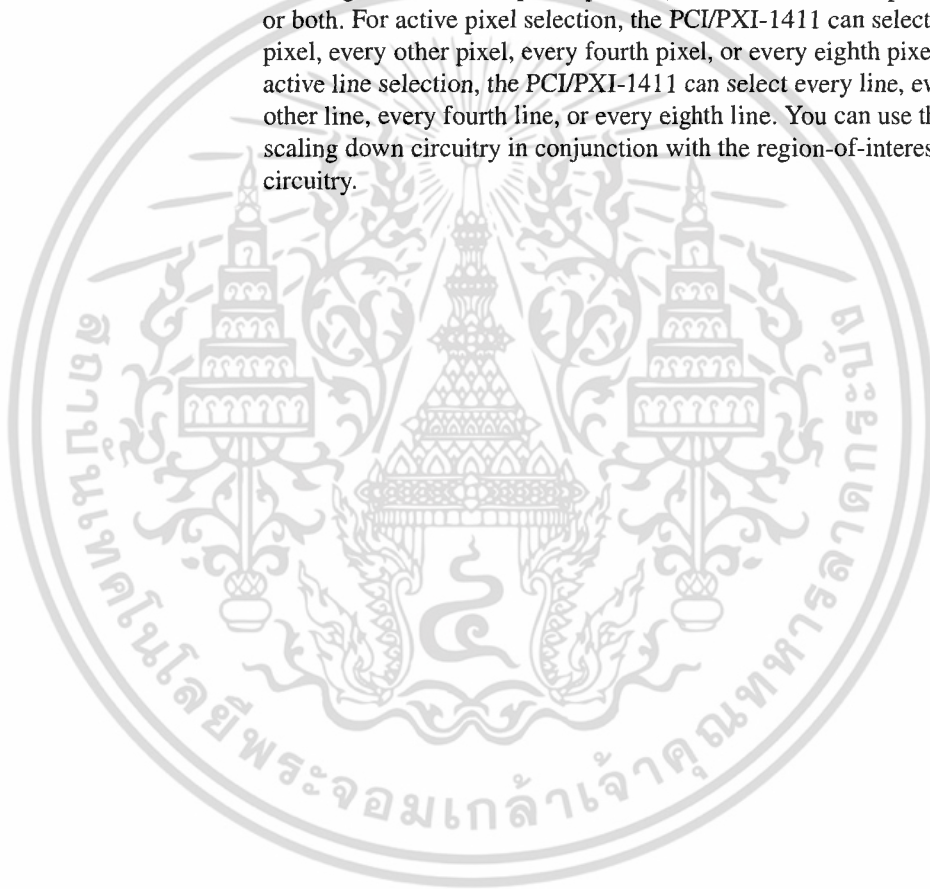
- Software control—The PCI/PXI-1411 supports software control of acquisition start. You can configure the PCI/PXI-1411 to capture a fixed number of fields or frames. Use this configuration for capturing a single frame or a sequence of frames.
- Trigger control—You can start an acquisition by enabling the external trigger line. This input can start a video acquisition on a rising or falling edge.
- Frame/field selection—With an interlaced camera and the PCI/PXI-1411 in frame mode, you can program the PCI/PXI-1411 to start an acquisition on any odd or even field.

Acquisition Window Control

You can configure numerous parameters on the PCI/PXI-1411 to control the video acquisition window. A brief description of each parameter follows:

- Acquisition window—The PCI/PXI-1411 allows you to specify a particular region of active pixels and active lines within the incoming video data. The active pixel region selects the starting pixel and number of pixels to be acquired relative to the assertion edge of the horizontal (or line) enable signal from the camera. The active line region selects the starting line and number of lines to be acquired relative to the assertion edge of the vertical (or frame) enable signal.

- **Region of interest**—The PCI/PXI-1411 uses a second level of active pixel and active line regions for selecting a region of interest. When you disable the region-of-interest circuitry, the board stores the entire acquisition window into onboard or system memory. However, when you enable the region-of-interest circuitry, the board acquires only a selected subset of the image frame.
- **Scaling down**—The scaling down circuitry also controls the active acquisition region. The PCI/PXI-1411 can scale down a frame by reducing the number of pixels per line, the number of lines per frame, or both. For active pixel selection, the PCI/PXI-1411 can select every pixel, every other pixel, every fourth pixel, or every eighth pixel. For active line selection, the PCI/PXI-1411 can select every line, every other line, every fourth line, or every eighth line. You can use the scaling down circuitry in conjunction with the region-of-interest circuitry.



4

Signal Connections

This chapter describes cable connections for the PCI/PXI-1411.

I/O Connector

The PCI/PXI-1411 uses one S-Video and two BNC connectors on the front panel to connect to video data inputs and the external trigger signal. Figure 4-1 shows the position of the three connectors.

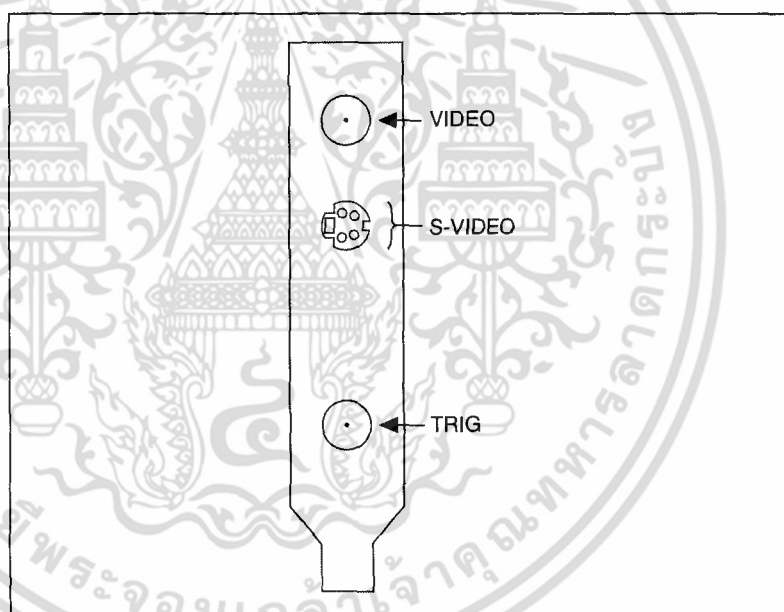


Figure 4-1. PCI/PXI-1411 Connectors

Signal Description

Table 4-1 describes each signal connection on the 1411 device connectors:

Table 4-1. I/O Connector Signals

Signal Name	Description
VIDEO	Composite Video—The signal allows you to make a referenced single-ended (RSE) connection to the video channel.
S-VIDEO	S-Video—A connector composed of two signals, as follows: Y—The Y signal of the S-Video connection contains the luma and synchronization information of the video signal. C—The C signal of the S-Video connection contains the chroma information of the video signal.
TRIG	External trigger—A TTL I/O line you can use to start an acquisition or to control external events. You can program the triggers to be rising or falling edge sensitive. You can also program the triggers to be programmatically asserted or unasserted similar to the function of a digital I/O line or to contain internal status signals (by using the onboard events). For a list of mappable status signals, see Chapter 3, <i>Programming with NI-IMAQ</i> , of the <i>NI-IMAQ User Manual</i> .
GND	Ground—A direct connection to digital ground on the PCI/PXI-1411.

Custom Cables

If you plan to make your own cables, refer to Figure 4-2 for the pin-out of the S-Video connector, as seen from the front of the PCI/PXI-1411.

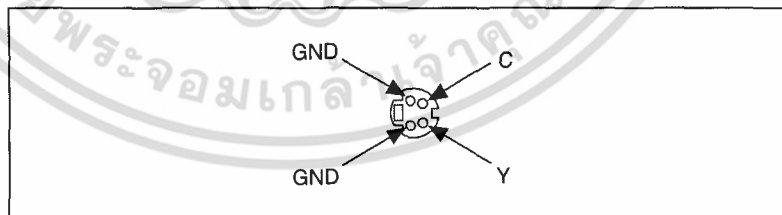


Figure 4-2. S-Video Connector Pin Assignments

A

Specifications

This appendix lists the specifications of the PCI/PXI-1411. These specifications are typical at 25 °C, unless otherwise stated.

Formats Supported

Input formats	
RS-170/NTSC.....	29.97 frames/s
CCIR/PAL.....	25 frames/s
Output formats	
RGB.....	32-bit
HSL.....	32-bit
R, G, B, H, S, or L.....	8-bit
Pixel aspect ratio.....	Square pixel

Video Input

Quantity.....	1 (VIDEO)
VIDEO.....	Composite video on BNC (RSE), Y/C on S-Video connector (RSE)
Input impedance.....	75 $\Omega \pm 1\%$
Input range (blank to white).....	700 mV (calibrated) or 400 mV to 1.00 V (variable gain) (PCI-1411 revision C and later, PXI-1411 revision A and later)
Frequency response (luminance)	
Full range.....	12 MHz (–3 dB) typ (all filters off)
Programmable.....	Decimation and lowpass filters

Accuracy

Absolute accuracy¹

Luma gain	± 2.5% of reading
Chroma gain	± 2.5% of reading
Temperature drift.....	<250 ppm/°C

A/D Conversion

Quantity	One 8-bit 2X oversampling for composite video Two 8-bit 2X oversampling for Y/C (S-Video)
Dynamic range.....	46 dB typ
Sampling Frequency	
RS-170/NTSC.....	27.54 MHz (double rate of square pixel)
CCIR/PAL	29.5 MHz (double rate of square pixel)

Color Decoding

Composite video	
Luma path.....	Chroma trap filter and/or line comb
Chroma path	Bandpass filter and/or line comb

Memory

Onboard memory	16 MB synchronous dynamic RAM
LUTs	Three 256 × 8 (RGB only)

¹ Calibration conditions:

White level	700 mV
Contrast	1.00
Saturation	1.00
Brightness	1.00
Luma bandwidth	Full
Ambient temperature	25 °C nominal

External Connections

Trigger sense	TTL
Trigger level	Programmable (rising or falling)

PCI Interface

PCI initiator (master) capability	Supported
PCI target (slave) capability	Supported
Data path	32 bits
Board voltage	5 V, 12 V, -12 V
Board type	32-bit half-size card
Parity generation/checking, error reporting	Supported
Target decode speed	Medium (1 clock)
Target fast back-to-back capability	Supported
Resource locking	Supported as a master and slave
PCI interrupts	Interrupts passed on INTA# signal
Base address registers	BAR0 (16 KB) BAR1 (64 KB)
Expansion ROM	4 KB
PCI master performance	
Ideal	133 Mbytes/s
Sustained	100 Mbytes/s

Power Requirements

Voltage	+5 V (1.00 A) +12 V (75 mA)
---------------	--------------------------------

Physical

Dimensions

PCI-1411.....	10.7 by 17.5 cm (4.2 by 6.9 in.)
PXI-1411	10 by 16 cm (3.9 by 6.3 in.)

Weight

PCI-1411.....	0.136 kg (0.3 lb)
PXI-1411	0.154 kg (0.34 lb)

Environment

Operating temperature	0–55 °C
Storage temperature.....	–20–70 °C
Relative humidity	5–90%, noncondensing
MTBF	839,653 h at 30 °C
Emissions.....	EN 55011:1991 Group 1 Class A at 10 m FCC Class A at 10 m
Functional shock (PXI only).....	MIL-T-28800 E Class 3 (per Section 4.5.5.4.1) Half-sine shock pulse, 11 ms duration, 30 g peak, 30 shocks per face
Operational random vibration (PXI only)	5 to 500 Hz, 0.31 grms, 3 axes
Nonoperational random vibration (PXI only)	5 to 500 Hz, 2.5 grms, 3 axes



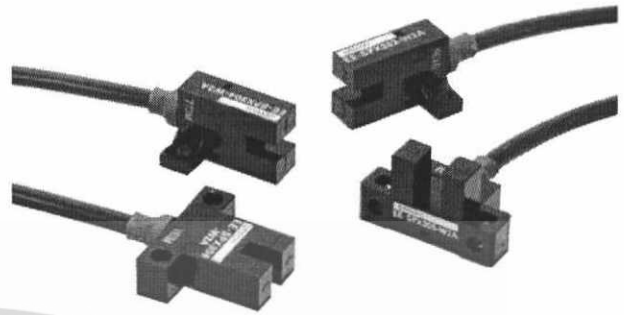
Note Random vibration profiles were developed in accordance with MIL-T-28800E and MIL-STD-810E Method 514. Test levels exceed those recommended in MIL-STD-810E for Category 1 (Basic Transportation, Figures 514.4-1 through 514.4-3).

EE-SPX-W

CSM_EE-SPX-W_DS_E_4_1

Photomicrosensor with built-in amplifier and attached cable reduces external light interference.

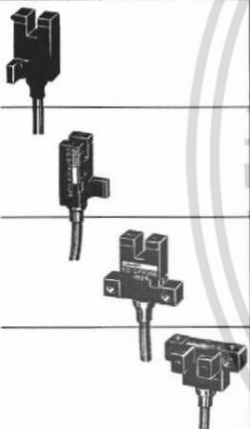

- Light modulation effectively reduces external light interference.
- Wide operation voltage range: 5 to 24 VDC
- Easy operation monitoring with bright light indicator.



 Be sure to read *Safety Precautions* on page 3.

Ordering Information

 Infrared light

Appearance	Sensing method	Sensing distance (slot width)	Output type	Output configuration	Cable length	Model
	Through-beam type	 3.6 mm	NPN output	Dark-ON	1 m	EE-SPX302-W2A 1M
				Light-ON		EE-SPX402-W2A 1M
				Dark-ON		EE-SPX304-W2A 1M
				Light-ON		EE-SPX404-W2A 1M
				Dark-ON		EE-SPX306-W2A 1M
				Light-ON		EE-SPX406-W2A 1M
				Dark-ON		EE-SPX305-W2A 1M*
				Light-ON		EE-SPX405-W2A 1M*

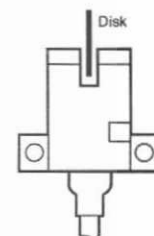
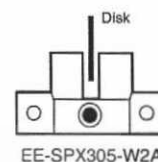
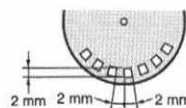
* These models (EE-SPX305/405-W2A only) are not conformed to CE standards.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ratings and Specifications

Item	Models	EE-SPX305-W2A EE-SPX405-W2A
	EE-SPX302-W2A, EE-SPX402-W2A EE-SPX304-W2A, EE-SPX404-W2A EE-SPX306-W2A, EE-SPX406-W2A	
Sensing distance	3.6 mm (slot width)	5 mm (slot width)
Sensing object	Opaque: 1 × 0.5 mm min.	Opaque: 2 × 0.8 mm min.
Differential distance	0.05 mm max.	
Light source	GaAs infrared LED (pulse lighting) with a peak wavelength of 940 nm	
Indicator *1	Light indicator (red)	
Supply voltage	5 to 24 VDC ±10%, ripple (p-p): 5% max.	
Current consumption	Average: 15 mA max.; Peak: 50 mA max.	
Control output	NPN voltage output: Load power supply voltage: 5 to 24 VDC Load current: 80 mA max. OFF current: 0.5 mA max. 80 mA load current with a residual voltage of 1.0 V max. 10 mA load current with a residual voltage of 0.4 V max.	
Response frequency *2	500 Hz min.	
Ambient illumination	3,000 lx max. with incandescent light or sunlight on the surface of the receiver	
Ambient temperature range	Operating: -10 to +55°C Storage: -25 to +65°C	
Ambient humidity range	Operating: 5% to 85% Storage: 5% to 95%	
Vibration resistance	Destruction: 10 to 55 Hz, 1.5-mm double amplitude for 2 h each in X, Y, and Z directions	
Shock resistance	Destruction: 500 m/s ² for 3 times each in X, Y, and Z directions	
Degree of protection	IEC IP50	
Connecting method	Pre-wired (standard cable length: 1 m)	
Weight	18.5 g	
Material	Case	Polycarbonate
	Holder	

- *1. The indicator is a GaP red LED (peak wavelength: 700 nm).
*2. The response frequency was measured by detecting the following rotating disk.



EE-SPX302-W2A

EE-SPX306-W2A

I/O Circuit Diagrams

NPN Output

Model	Output configuration	Timing charts	Output circuit
EE-SPX402-W2A EE-SPX404-W2A EE-SPX405-W2A EE-SPX406-W2A	Light-ON		<p>* Voltage output (when the sensor is connected to a transistor circuit)</p>
EE-SPX302-W2A EE-SPX304-W2A EE-SPX305-W2A EE-SPX306-W2A	Dark-ON		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Engineering Data (Typical)

Sensing Position Characteristics

EE-SPX302-W2A

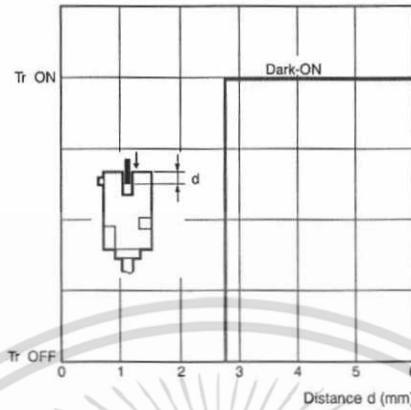
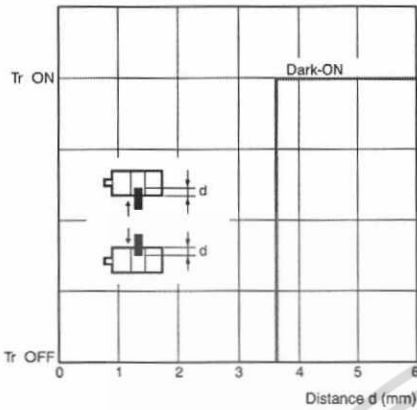
EE-SPX304-W2A

EE-SPX306-W2A

EE-SPX302-W2A

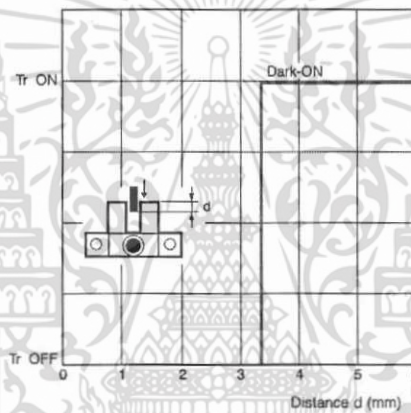
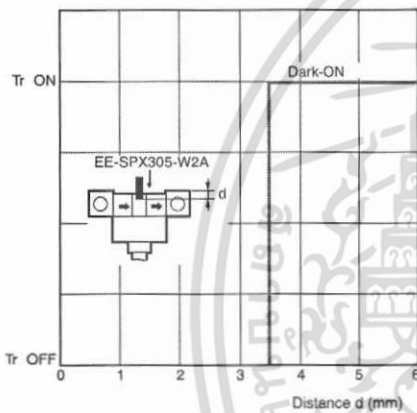
EE-SPX304-W2A

EE-SPX306-W2A



EE-SPX305-W2A

EE-SPX305-W2A



Safety Precautions

Refer to *Warranty and Limitations of Liability*.**⚠ WARNING**

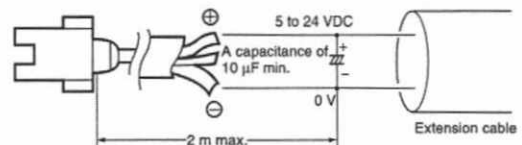
This product is not designed or rated for ensuring safety of persons either directly or indirectly. Do not use it for such purposes.

**Precautions for Correct Use**

Make sure that this product is used within the rated ambient environment conditions.

● **Wiring**

- When extending the cable, use an extension cable with conductors having a total cross-section area of 0.3 mm². The total cable length must be 2 m maximum.
- To use a cable length longer than 2 m, attach a capacitor with a capacitance of approximately 10 μF to the wires as shown below. The distance between the terminal and the capacitor must be within 2 m. (Use a capacitor with a dielectric strength that is at least twice the Sensor's power supply voltage.)



- Make sure the total length of the power cable connected to the product is less than 10 m even if a capacitor is inserted.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

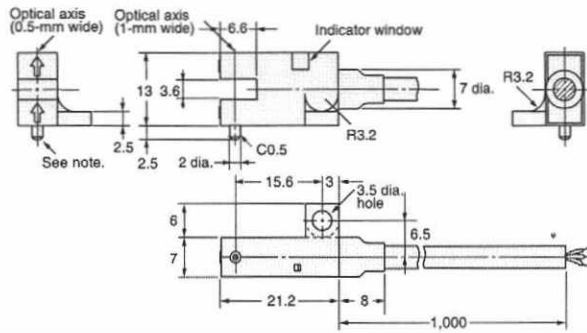
EE-SPX-W

(Unit: mm)

Dimensions

Tolerance class IT16 applies to dimensions in this datasheet unless otherwise specified.

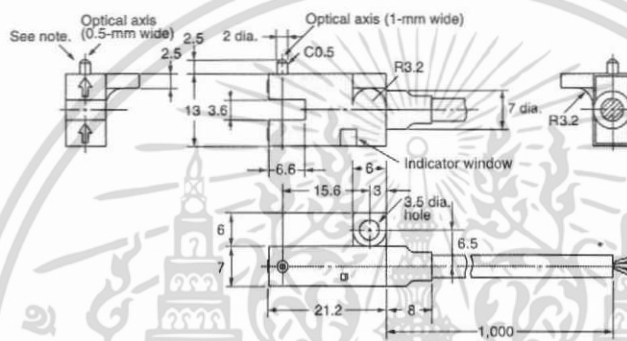
EE-SPX302-W2A
EE-SPX402-W2A



* Vinyl-insulated round cable of 3.5 dia., 3 cores, (0.14 mm² with 1.0-dia. insulator); Standard length: 1 m

Note: The lug is used to prevent turning and to indicate the optical axis. When installing, make a fixed hole of 2.1 to 2.3 mm dia.

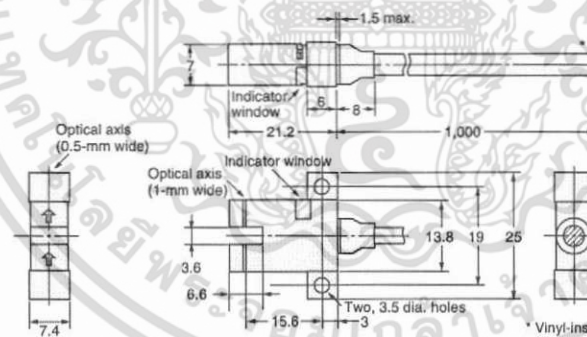
EE-SPX304-W2A
EE-SPX404-W2A



* Vinyl-insulated round cable of 3.5 dia., 3 cores, (0.14 mm² with 1.0-dia. insulator); Standard length: 1 m

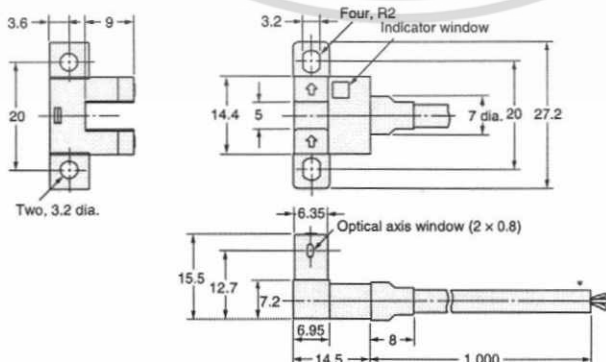
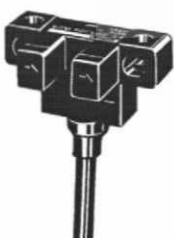
Note: The lug is used to prevent turning and to indicate the optical axis. When installing, make a fixed hole of 2.1 to 2.3 mm dia.

EE-SPX306-W2A
EE-SPX406-W2A



* Vinyl-insulated round cable of 3.5 dia., 3 cores, (0.14 mm² with 1.0-dia. insulator); Standard length: 1 m

EE-SPX305-W2A
EE-SPX405-W2A



* Vinyl-insulated round cable of 3.5 dia., 3 cores, (0.14 mm² with 1.0-dia. insulator); Standard length: 1 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DST Conference '09

**“Breaking through the performance
limit of HDD Technology”**

Thailand Science Park Convention Center (TSP-CC)
at NECTEC, Bangkok, THAILAND

May 13-15, 2009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปได้

A 3D Model for A Solder Joint Bridging Effect in HGA manufacturing: Simulation and Validation

Wararat Lertkittiwattanakul
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand

Reangroaj Rojanasiri, Adisak Tokaew, Wachira Puttichaem
Western Digital Thailand Co. Ltd
140 Moo2, Bangpa-in Industrial Estate, Klongjig, Bangpa-in,
Ayuthaya 13160, Thailand

Siridech Boonsang
College of Data Storage Technology and Applications (DSTAR)
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Abstract- Solder bridging is a serious defect of solder joints in ultra-fine pitch devices such as head gimbal assemblies (HGA). A three-dimensional model to simulate the formation process of the solder joints bridge of slider and suspension in HGA assemblies is formed and numerically simulated to predict formation shape using Surface Evolver program. Based on these results, solder bridging mechanism and factors influencing the solder bridge are investigated involves solder volume, wetting angle. The result show that 'it is a critical solder volume V_c for the solder joints to avoid solder bridging, which can be used to evaluate anti-bridging ability of the solder joints.

Keywords: Head Gimbal Assemblies; solder joint-bridging; surface evolver; solder volume; wetting angle

I. INTRODUCTION

In HGA assembled processes, one of the key processes is laser solder jet bonding (SJB) of electrical connections between sliders and suspensions. In SJB machines, solder balls are singulated and jetted through a nozzle to make electrical connections between sliders and suspensions. During jetting, solder balls are melted via pulsed laser with times between 0.1 and 10 ms. Pressure of inert gas jets molten solder through capillary. Solders are melted and jetted on times close to a laser pulse width. One of the major defects of products from a SJB process is principally caused by a solder bridging effect. The main factors determined whether the solder bridging occurs are a solder ball's wetting angle and its dynamic behavior. Various chemical and physical phenomena influencing wetting angle dynamic are difficult to modeled or formulated at an acceptable accuracy. In addition, the advanced hard-drive technology requires the smaller size of sliders and suspensions. This requirement is a driving force for better prediction of a wetting angle and dynamic behavior of solder jetting deposition in order to minimize the solder bridging defects.

Several researchers have proposed numerical models for the prediction of solder joints. S. M. Heinrich established a 2D model of a solder joint using the numerical simulative method and the results were applied on the mechanical reliability analysis of solder joints [1]. K. A. Brake developed a Surface Evolver program to predict 3D molten metal shaping based on

the minimum energy principle [2]. Many other researchers also attempted to narrate interconnecting solder joints of high density packaging devices using the Surface Evolver program and the mechanical reliability of solder joints was then analyzed [3-4]. Another model used to interpret solder bridging of fine pitch leads is built by the authors and the solder bridging process is investigated using the Surface Evolver program [5].

The purpose of this study is to investigate the factors influencing solder bridging using a 3D model based on the Surface Evolver program. These factors include wetting angles of molten solder on slider and suspension surfaces. The model is validated by comparing the calculated solder bridging geometry with that obtained from the high resolution SEM images of real solder bridging.

II. MODELING APPROACHES

A. The surface evolver program

SURFACE EVOLVER [4] has the ability to predict solder joint shapes. Given a set of geometrical constraints (pad, lead, board geometry) and materials data (surface tension, wetting angles and gravity) this code is capable of predicting equilibrium joint shapes. It has been used to investigate the impact of a range of process parameters such as solder volume, surface tension, pad size, etc. and their relationship to the formation of solder defects such as bridging [6]. The details of the Surface Evolver program and the theory associated with the program are extensively provided in the manual [4].

B. Simulation of a slider-suspension solder joint bridging

The Surface Evolver program requires information as an input in the form of an initial data file. This file comprises of the initial positions of the vertices, oriented connectivity information for the construction of surface edges and facets from the initial vertices, system constraints and user-defined parameters. The initial shape of the surface as define in the input data file is normally unrealistic. In this work, the initial model is presented in the Figure 1. The geometry of slider and suspension is obtained from CAD drawing [7]. Therefore, it is comparable with the actual HGA geometry. The solder

geometry is chosen to give a volume in the desired range of investigation. The volume may also be changed interactively during simulation in which volume is a dependent variable.

The solder is assumed to be a laminar, isothermal, incompressible, and Newtonian liquid. The wettabilities of solder on the slider and suspension pad are independent parameters in this study. The effect of gravity in the calculation is in the plane as shown in Figure 2. The slider and suspension are configured in the direction of 45 degree to the horizontal plane. A molten solder is jetted through a nozzle (placed just above the slider-suspension configuration) and made electrical connections between sliders and suspensions. Only a pair of slider and suspension is electrically connected for each molten solder. For example, in Figure 1, the solder ball 2 is in the liquid state while the solder ball 1 has already solidified. This situation is completely different to the bridging model of a reflow process described in the literature [5]. In the reflow process the solder bridging occurs by two molten solder in liquid state. Therefore, the shape of the bridging tends to be symmetry.

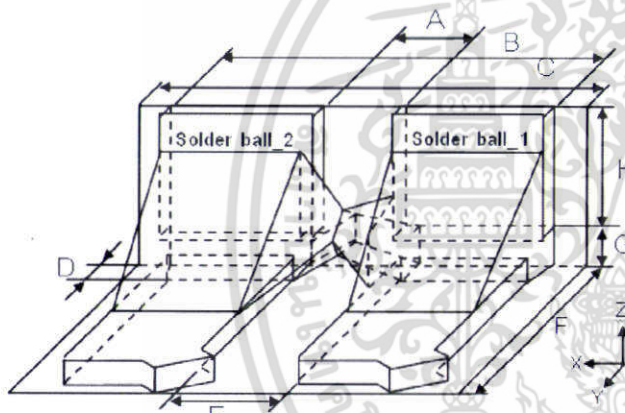


Figure 1 initial model of a slider-suspension solder joint bridging

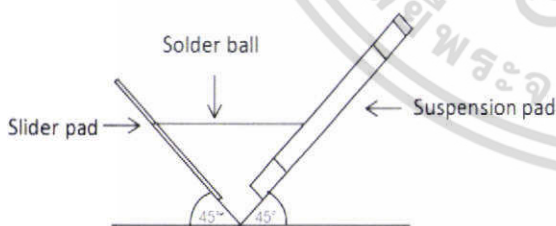
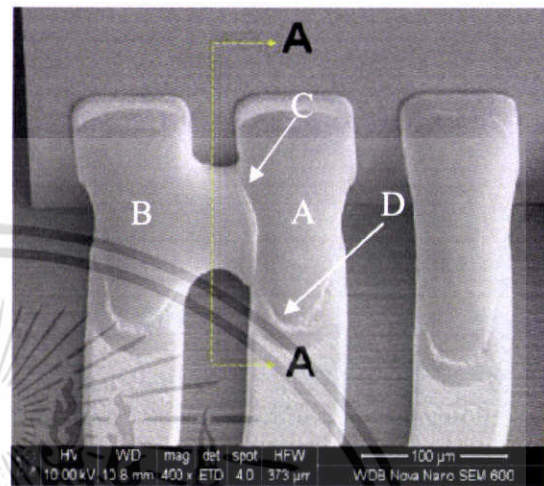


Figure 2 Side view of the initial model

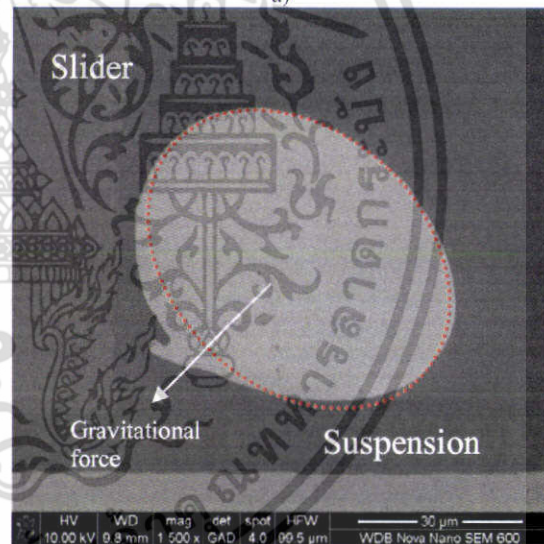
III. RESULTS AND DISCUSSIONS

Figure 3(a) shows a typically SEM image of solder joint bridging. The solder ball A was jetted onto the slider and suspension before the solder ball B. As mentioned above, the solder ball B was in the liquid state while the solder ball A had already solidified. The surface topology labeled as C in Figure

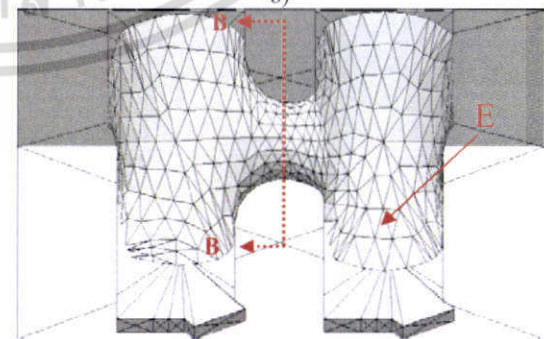
3(a) is the interfacing area between the molten solder B and the solidified solder A. The cross section image of the bridging at plane A-A is shown in Figure 3(b). The cross section has an elliptical shape due to the gravitational force as shown in the Figure.



a)



b)



c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้

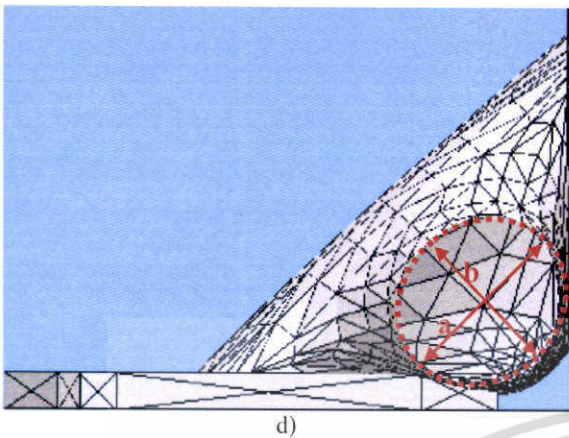


Figure 3 a) a SEM image of the actual slider-suspension solder joint bridging b) a cross section image of the image (a) at the plane A-A c) an output image from a Surface Evolver program d) a cross section image of the image (c) at the plane B-B

Figure 3(c) shows the final shape of the solder bridging effect from the Surface Evolver calculation using the model described in Figure 1 and 2. The overall appearance of the calculated result is comparable with the SEM image shown in Figure 3(a). Minor discrepancy is in the area shown in Figure 3(a) labeled D and shown in Figure 3(c) labeled E. This is due to the temperature dependent surface tension of molten solder. The cross section image of the simulated bridging at plane B-B is shown in Figure 3(d). The cross section area is fitted with the elliptical equation and shown in the dotted line. Such equation is also used to generate the elliptical curve (dotted red curve) in the Figure 3(b) for making the comparison. The good agreement is found between the simulation and the real solder bridging. This confirms the validity of our model.

The model is also used to investigate the factors influencing the solder bridging. In this research, we are interested in the wettability of a molten solder on the surface of slider and suspension. In soldering process, the wettability of a molten solder is one of the important parameters. The more wettability (lower wetting angle) indicates the more tendency of a molten solder to spread out over the surface. The more spreading of a molten solder increases the chance of the bridging between two adjacent pads when the solders have enough volume. Many factors (i.e. the cleanness of the slider surface, the temperature of a molten solder, the composition of a solder ball) influence the wettability of a molten solder ball. In an industrial process, it is relatively difficult to achieve the fixed wetting angle of a solder. This is due to the variations in many factors such as material, process parameters. Generally, the wetting angle is varied +/- 20% reference to the design value. Therefore, in order to avoid the bridging effect, it is essential to identify the range of the solder ball critical diameter (or volume). The critical diameter D_c is the diameter of solder ball that has its minimum volume, which sustains a stable bridging between two adjacent slider-suspension pairs. Figure 4 shows the results from the model using the wettability of a molten solder on each

surface as the independent variables shown as a horizontal axis. The vertical axis is the critical diameter of a solder ball. The calculation is based on the material data shown in the company manual [7]. The differences between each plot are the variations on the wettability on each surface. To avoid the solder bridging, the solder ball diameter D has to be less than the critical diameter ($D < D_c$). The critical diameter in the Figure 4 is the normalized value to the initial solder ball diameter (D_i) recommended in the company manual [7].

IV. CONCLUSION

In this paper, we proposed the numerical model based on the Surface Evolver program to simulate the solder joint bridging effect of slider-suspension connections in HGA process. The good agreement is found between the simulation and the real solder bridging. The model is also used to investigate the factors influencing the solder bridging. Based on these results, solder bridging mechanism and factors influencing the solder bridge are investigated involves solder volume, wettability of a molten solder on each surface. The model can be effectively used to determine the size of a solder ball to avoid the solder bridging effect.

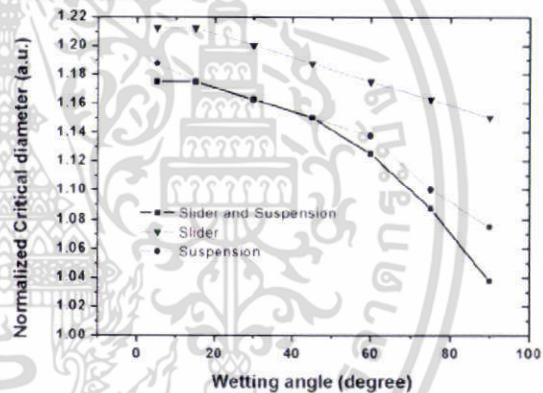


Figure 4 the effect of wettability of a molten solder on each surface.

REFERENCES

- [1] Gao, Y. X., Fan, H., and Xiao, Z., 2000, "A Thermodynamics Model for Solder Profile Evolution," *Acta Mater.*, Vol. 48, pp. 863-874.
- [2] Conway, P. P., Kalantary, M. R., and Williams, D. J., 1996, "Experimental Investigation of the Formation of Surface Mount Solder Joints," *ASME J. Electron. Packag.*, Vol. 118, No. 4, pp. 223-228.
- [3] Heinrich, S. M., and Lee, P. S., 1997, "Solder Geometry Prediction in Electronic Packaging: An Overview," *Advances in Electronic Packaging*, Vol. 19, No. 2, pp. 1371-1376.
- [4] Brake, K. A., 1998, "Surface Evolver Manual," Version 2.10, The Geometry Center, University of Minnesota, Minneapolis.
- [5] Wang, G. Z., Chen, Z. N., and Wang, C. Q., 1998, "Computer Simulation of Three Dimensional Castellated Solder Joint Geometry in Surface Mount Technology," *Modell. Simul. Mater. Sci. Eng.*, 6, pp. 557-567.
- [6] L. M. Racz, J. Szekdy, and K. Brakke, "A General Statement of the Problem and Description of a Proposed Method of Calculation of some Miniscus Problems in Materials Processing," *ISIJ International*, V33, n2, 328-335, (1993)
- [7] Western Digital internal report.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DST-CON 2011

The 4th International Data Storage Technology Conference

Thailand – The paragon of the world's HDD manufacturing

IMPACT Convention Center (Hall 9)

Muangthong Thani, Nonthaburi, Thailand

January 9-10, 2012

Organized by



Thailand Board of Investment (BOI)
<http://www.boi.go.th>



National Science and Technology
Development Agency (NSTDA)
<http://www.nstda.or.th>



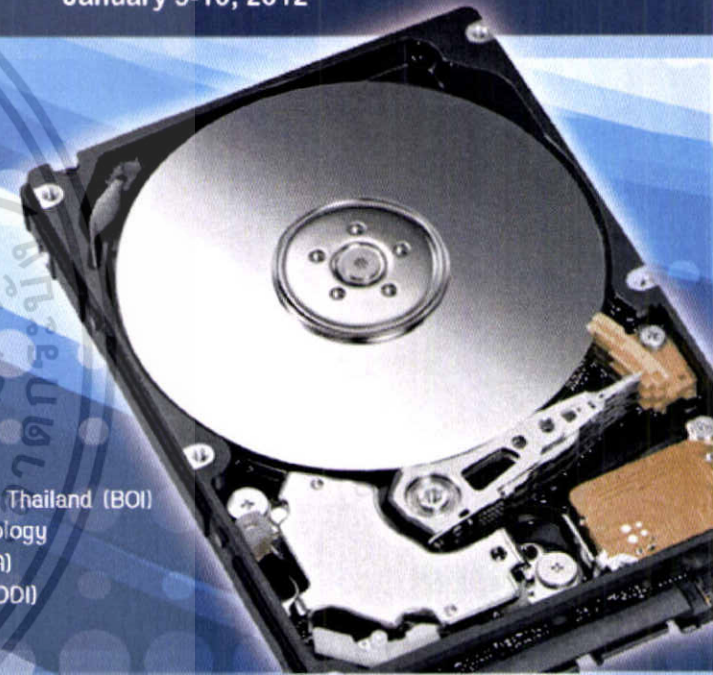
Hard Disk Drive Institute (HDDI)
<http://www.hddi.in.th>



I/U CRC in HDD Component
<http://www.hddi.kmutt.ac.th/>

Organized by

The Board of Investment of Thailand (BOI)
National Science and Technology
Development Agency (NSTDA)
Hard Disk Drive Institute (HDDI)
I/U CRC in HDD Component



DST-CON 2011

Sponsored by



A Flash Photography Method for the Measurements of the Fluid flow Dynamic of a Fluid Dispensing System

S.Boonsang^{#1} and W.Lertkittiwattanakul^{*2}

[#]College of Data Storage Innovation

^{*}Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

¹kksiride@kmitla.ac.th

²s1060415@kmitl.ac.th

Abstract— In this paper, we present a flash photography method for the measurements of the fluid flow dynamic of a fluid dispensing system. A fluid dispensing system is one of the key processes to deliver fluid materials to various positions in assembly parts electronics manufacturing industries. The dispensing process is a complex dynamic process and time-dependent. The parameter identification of a fluid dispensing model by using with measurement values of the accumulated final volume is usually employed. This technique may not provide the satisfactory results. To improve the accuracy of the parameter identification, the fluid flow measurements based on the flash photography methods is proposed. To verify the performance of the proposed system, the experiments with various fluid levels inside syringe were carried out. The pressure dependent fluid flow curve constructed from the measurement values is presented, in order to identify the parameters associated with the model. The identified parameters are consistent with the fluid properties.

Keywords— Time-pressure dispensing, non-Newtonian fluid, laminar flow, consistency index, flash photography.

I. INTRODUCTION

A fluid dispensing system is one of the principal processes in electronics manufacturing industries such as surface mount technology (SMT) and Hard Disk Drive (HDD) assemblies [1]. It is designed to deliver fluid materials such as epoxy, adhesive, encapsulant to various positions in assembly parts. In SMT processes, a dispensing system is normally used to apply the solder paste onto pads of a printed circuit board (PCB) before performing the reflow soldering process. As the reduction of the pad size/pitch and demand for high reliability electrical interconnection, the amount and profile of the solder paste formed on the PCB has to be well controlled. The comparable circumstances occur in HDD assembly industries where a dispensing system is used in many processes. One of the key critical processes is the recording head (slider) and a supporting structure (suspension) attachment. This can be achieved by the application of micron-size adhesive dot on to the desired position of the suspension. The automatic placement of the slider on top of the adhesive dot is performed before curing in a UV curing system. The amount and profile of the adhesive dot is the critical parameter in the current

HDD manufacturing process, since the dramatically reduced in slider and suspension geometry.

A time-pressure dispensing is generally complex dynamic process and difficult to control [1]. This is due to the system performance can be affected by many process parameters such as an air pressured supply, a fluid temperature, structural parameters of a system and a flow behavior of the fluid being dispensed. The inconsistent amount of fluid dispensed can be occurred due to the changes in process parameters (air volume or fluid level) during dispensing action. This is a serious consequence in the time-pressure dispensing process [1-3]. To eliminate such a problem, there are numerous models developed and evaluated to accurately predict the performance of the dispensing process. The extensive review of the models to predict the performance of time-pressure dispensing model can be found in [1].

Li *et al.* proposed the model identification method for the estimation of the process parameters and used as the initial values for the adaptive control of the process [2]. In addition, other methods based on system identification method were also used to identify the process parameters [2]. However, most of the parameter identification methods described in literature [1] is relied on the measurements of the final dispensing volume. The volume measurements are then related to the equation (5) by time-integration. Since the dispensing process in a complex dynamic process and time-dependent, therefore, the parameter identification with measurement values of the accumulated final volume may not provide the satisfactory results. The fluid flow measurements based on the flash photography methods is proposed in this paper, in order to assist the model identification.

II. MODELING APPROACHES

A. Modeling of a fluid dispensing process

A fluid dispensing process has been studied by many researchers [1-4] for the last two decades (Figure 1). The key issues are to characterize and represent the flow behavior of the fluid being dispensed as it causes significant effects on the process performance. The flow rate of a dispensing process can be manipulated by many factors such as an air pressured supply, a fluid temperature, structural parameters of a system and a flow behavior of the fluid being dispensed. Under the

assumption of the fluid of non-Newtonian flow behavior as the most of the fluid used in electronics and HDD manufacturing process, the relationship between the shear stress and the shear rate in the fluid is typically non-linear. There are several models to describe such a non-linear relationship [4]. Among these models, the generalized power law is the most accepted and can be written by [1-2,4]:

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

where τ and τ_0 are a shear stress and a yield stress, respectively. $\dot{\gamma}$ is the shear rate and K is consistency index. Normally, the values of n , τ_0 and K can be determined experimentally using the instruments such as rheometers.

In a typical fluid dispensing process, we generally assume that the fluid is incompressible and time-independent. And also the fluid flow inside the needle is laminar flow and no slip between the fluid and the needle wall. The inner shear stresses at any point in cylinder with radius r and the needle radius R can be given by [1-2]:

$$\tau = \frac{r\Delta P}{2L}; \text{ and } \tau_w = \frac{R\Delta P}{2L} \quad (2)$$

where ΔP is the frictional pressure drop in the needle and L is the needle length.

For the fully developed flow inside the needle, the following relationship may be derived relating the shear stress at the wall of the needle τ_w to the volume of fluid flowing per second through the needle cross-section, Q , and the shear stress [4]:

$$Q = \frac{\pi R^3}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (3)$$

where the $f(\tau)$ is the relationship between shear stress and shear rate of the fluid being dispensed. With the generalized power law of equation (1) and (3), the flow rate of the fluid through the needle can be derived by [1-2]:

$$Q = \frac{\pi R^3}{K^{1/n} \tau_w^3} (\tau_w - \tau_0)^{(n+1)/n} \times \left[\frac{n}{3n+1} \tau_w^2 + \frac{2n^2}{(2n+1)(3n+1)} \tau_w \tau_0 + \frac{2n^3}{(n+1)(2n+1)(3n+1)} \tau_0^2 \right] \quad (4)$$

By substituting (2) into (4) and rearranging with the approximation of a yield stress, τ_0 that is much smaller than the frictional pressure drop, ΔP , we can rewrite the equation (4) by [1]:

$$Q = K_1 \Delta P^N + K_2 \Delta P^{N-1} + K_3 \Delta P^{N-2} \quad (5)$$

where $N = 1/n$ and the coefficients K_1, K_2, K_3 are

$$K_1 = \frac{2L\pi n R^2 C^{1+(1/n)}}{K^{1/n}(3n+1)} \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{8L^2 \pi n^2 R \tau_0 C^{1+(1/n)}}{K^{1/n}(2n+1)(3n+1)} \quad (7)$$

$$K_3 = \frac{16L^3 \pi n^3 R \tau_0^2 C^{1+(1/n)}}{K^{1/n}(n+1)(2n+1)(3n+1)} \quad (8)$$

and $C = (R - r_0)/2L$ and the critical diameter $r_0 = 2\tau_0 L / \Delta P$.

The model described above has been used to investigate and control the flow rate in the fluid dispensing process [2]. In order to effectively identify the parameters N, K_1, K_2, K_3 , our proposed system

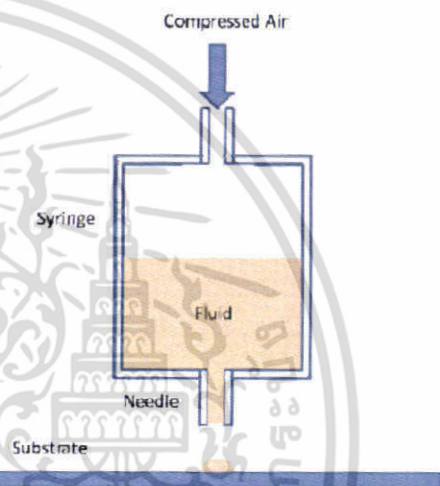


Figure 1 a diagram of a typical fluid dispensing system.

B. Experimental setup

The experimental setup is shown in Figure 2. It comprises of two main parts. These include the fluid dispensing system and the flash photography system. The fluid dispensing system consists of a voltage-controlled pressure regulator (SMC), transmission line and a dispenser containing a syringe and a needle. In order to monitor the pressure, a high precision pressure transducers (SMC) is connected to the special design connector mounted on the dispensing syringe. The magnitude and duration of pressurized air are controlled by using the voltage-controlled regulator. The desired values of magnitude and duration of pressurized air are configured using the signal generator (Agilent) in which the output signal is sent to the regulator. Therefore, the amount of fluid dispensed can be regulated. The signals from signal generator are also used for the synchronization with the flash photography system as described below.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

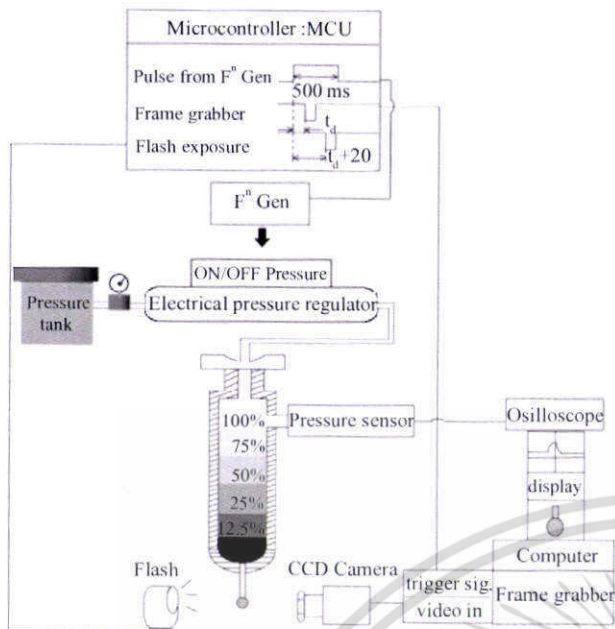


Figure 2 the diagram of experimental setup.

For visualizing and calculating the volume of the dispensing droplet, the flash photography system is utilized. The setup is shown in Figure 2. The signal of the dispensing actuation from the signal generator is sent to the programmable delay generator as the trigger signal. Upon receiving the trigger signal, the delay generator sends out TTL signals to the frame grabber card (National Instrument PCI-1411, connected to the CCD camera) and to the LED flash with different trimming. The signal for the operation of LED flash has to be 20ms delayed from the one for the frame grabber, in order to capture a dispensing droplet simultaneously. The delay time between the trigger signal and the TTL signals for the frame grabber can also be programmed via the delay generator. By changing such a delay time, images with different delay time from droplet ejection can be captured. These images are combined to obtain a sequence of drop formation. As a consequence, these images of separate drops can be used as a substitute for the actual process drop formation. The captured images are then processed in the PC by the program written in NI platform as described in the following section.

C. Determination of droplet volume from captured images

The droplet volume for each image sequence can be determined by an algorithm proposed by Thurow *et. al.* [5]. The examples of captured images at different delayed times of 0ms, 250ms and 500ms are shown in Figure 3 (a), (b) and (c) respectively. They also show the resulting images from the volume calculation algorithm. The image processing algorithm consists of four steps as follows:

1. Identification of Region of Interest (ROI). In this step, the capture image area is adjusted so that the tip of dispensing

needle is approximately limited to the middle of the upper half of the image. Once the droplet is formed at the tip of the needle, the droplet is approximately in the middle of the image as shown in the figure 3(b) and (c). By performing this adjustment, we can reduce the image region to be analyzed and therefore the computational time required.

2. Detection of droplet contour. The edge detection algorithm is used to create the contour of the droplet and the needle from the captured images. Firstly, the image of needle without droplet is processed with edge detection algorithm as shown in Figure 3(a). This contour is used as the reference to the other images with droplet together with needle. In Figure 3(b) and (c), the contour of the droplet and the needle can be clearly identified after performing the edge detection algorithm.

3. Image subtraction. For the droplet volume calculation, the contour of the droplet without the one of needle is required. This can be achieved by performing the image subtraction between the image with needle contour only and the one with both needle and droplet. The resulting images are the contour of the droplet only as shown in Figure 3(b) and (c) (right hand side).

4. Volume calculation from the droplet contour. By assuming the droplet is rotational symmetry, the three dimensional volume of the droplet can be approximately calculated by two-dimensional droplet contour. The droplet contour from the previous step is cut into stripes in order to calculate the volume of the rotational body similar to the procedure described in [5]. These stripes are set vertically inside and fill up the droplet contour. The three dimensional slice of equal thickness are then calculated from these stripe. The volume of each slices can be calculated by [5]:

$$V_n = \pi r_n^2 d \quad (6)$$

where d is the thickness of the stripe. In our case, d is equal 1 pixel of image resolution. r is the radius of the stripe. The values of r can be calculated by the horizontal length of each stripe. n is number of slice. The volume of rotational body of the droplet can be estimated by adding individual slices together which is [5]:

$$V_{droplet} = \sum_{n=1}^N V_n = \sum_{n=1}^N \pi r_n^2 d. \quad (7)$$

The calculated volume is in the unit of pixels. Therefore, we need to convert such a volume to the SI unit by using the x and y resolutions of the photographic system. In our case, the resolutions in x and y directions of the optical system are $25 \mu\text{m}$ and $20 \mu\text{m}$ per pixel respectively. For examples, the images of the droplets shown in Figure 3 (b) and (c) were processed with previously described procedure and the estimated volumes are 1.38 and 9.42 mm^3 respectively.

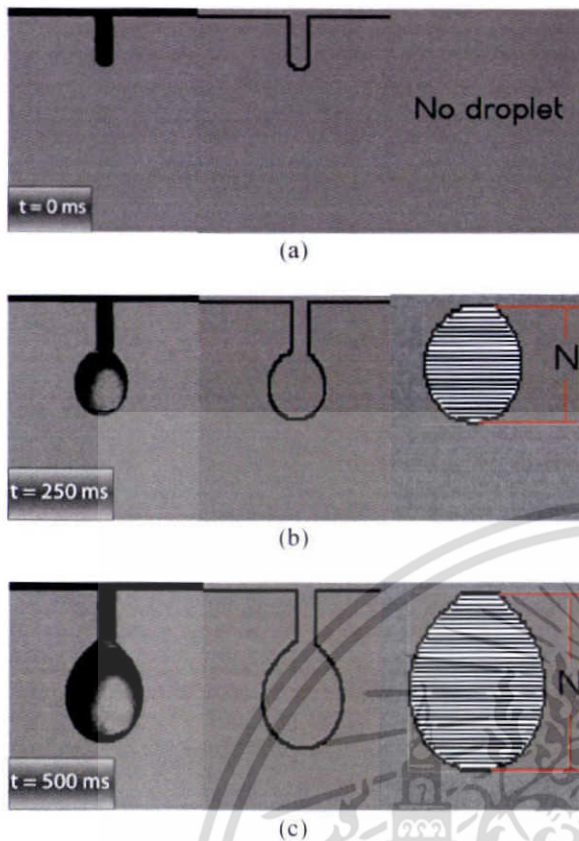


Figure 3 The examples of captured images at different delayed times of 0ms, 250ms and 500ms and N is the number of sheed layers

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

For the performance assessment of the proposed system, we performed the experiment with concentrated syrup with the viscosity of 199 cP (measured by Brookfield/LVDV-III at 25 degree C). The fluid was filled in the syringe at different level measured by a photographic method. The flash photography system described above was performed simultaneously with the dispensing process at different fluid level.

Figure 4 shows a typical trigger signal recorded from the signal generator. Such a signal was sent to the voltage-controlled pressure regulator for the activation dispensing process. Since the pressurized air passes through a pipe and other mechanical fittings, therefore, the dynamic pressure inside the syringe is normally delayed and behaves like first order system. A typical pressure signal recorded from the pressure sensor mounted onto the syringe is shown as the squared symbol in Figure 4. The time constant of the pressure dynamic during the fluid dispensed out is different from that of the pressure dynamic during stop dispensing. This may be caused by the different in air volume inside the syringe during ON-OFF period. In this paper, we consider only during the ON period for the construction of the fluid dispensing model.

After the image processing as the procedure described previously, the droplet volume can be estimated for each captured images at different delayed times. The time-

dependent droplet volume starting from the beginning of the dispensing action can also be calculated and shown in Figure 5. This is a typical result from the experiments with the fluid level inside the syringe of 12.5%. The data was calculated only during the period of the air pressure inside syringe is ON status (0-500ms). The results show the progressively rise similar to the simulation results in literature [2]. In order to represent the flow dynamic behavior of the fluid, the numerical curve fitting was performed by using the least square fitting procedure. The fitted equation is shown in the inset of the Figure 5. The solid curve shown in Figure 5 is the calculated data from the fitted equation. The time-dependent fluid flow rate is then calculated by the time differentiation of the fitted equation.

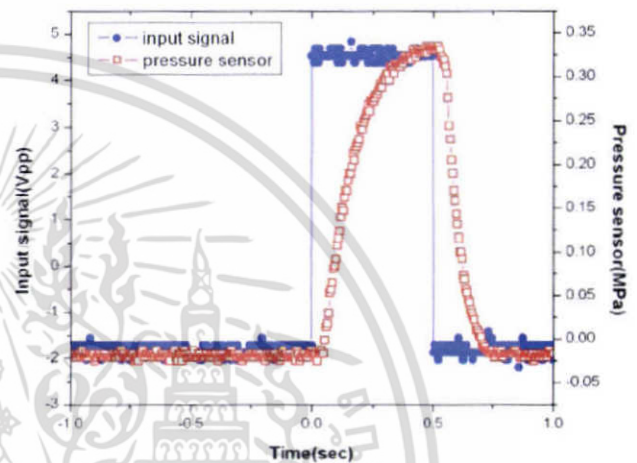


Figure 4 A typical trigger signal (dotted) from the signal generator recorded during the activation of the voltage-controlled pressure regulator for the dispensing action and a typical pressure signal (squared) recorded from the pressure sensor mounted on the top of syringe during the dispensing action.

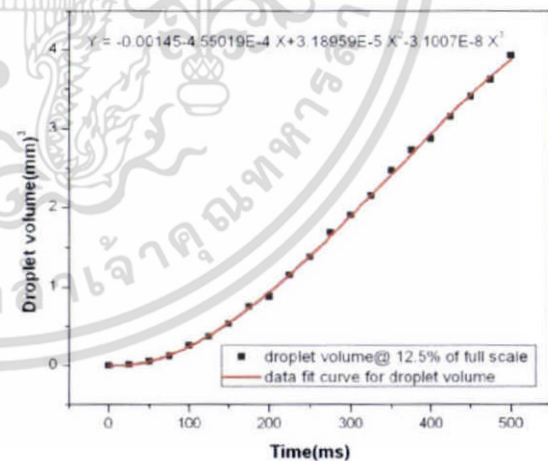


Figure 5 Time dependent calculated droplet volumes (squared) from a set of droplet image sequence by the image processing procedure with the fluid level inside the syringe of 12.5% and the numerical fitting curve (solid line) calculated by the least square fitting procedure to the polynomial equation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In order to identify the parameters associated with the model described by equation (5), the pressure dependent fluid flow curve is required. The pressure dependent fluid flow curve is the plot of the time-dependent pressure values against the calculated fluid flow rate from the equation of the time-dependent fluid flow rate. Figure 6 shows the average values of pressure-dependent fluid flow curve (squared). The experiments were performed five times at the same fluid level of 12.5% and the standard deviation is shown as the error bar. The numerical fitting procedure based on the least square fitting was performed in order to fit the experimental values (squared) to the equation (5). The fitted equation is shown in the inset of the Figure 6 and the solid line is the fitted curve. The calculated values of N is 2.33 or $n=0.43$. Such a value indicates that the type of fluid is pseudoplastic, or shear-thinning fluids. This is consistent with the fluid properties of the concentrated syrup used in this study.

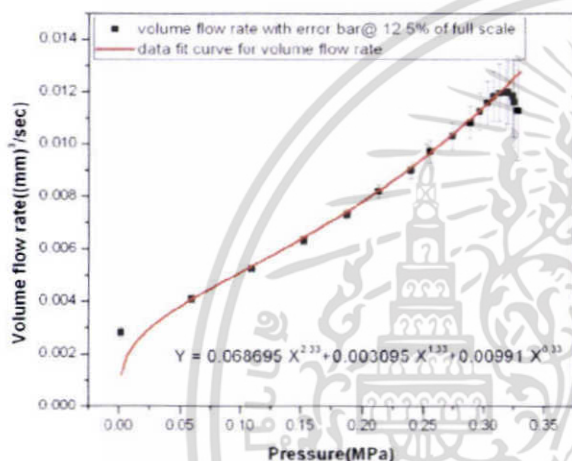


Figure 6 Pressure-dependent fluid flow curve (squared) at the fluid level of 12.5% and the numerical fitting curve (solid line) calculated by the least square fitting procedure to the equation (5)

For the assessment of the influence of the fluid level in syringe, the experiments were performed with different fluid level listed in Table I. The N values of different fluid level show slightly changed. This is due to the N values is principally contributed by the fluid rheological properties rather than the process parameters. However, the fluid level in syringe dramatically affects the parameters K_1, K_2, K_3 , thereby changing the fluid volume dispensed. The decreasing fluid level generally causes the increasing in the parameter values. This is similar to the simulation results presented in literature [1]. Therefore, to completely model the fluid dispensing process, the changes of parameters K_1, K_2, K_3 , has to be accounted as the fluid height changes.

Fluid level in syringe	N	K_1	K_2	K_3
100%	2.23	0.05489	0.0013	0.0058
75%	2.30	0.05489	0.0019	0.0084

50%	2.28	0.05489	0.0019	0.0089
25%	2.33	0.05489	0.0021	0.0099
12.50%	2.33	0.06869	0.0031	0.0099

Table I the summary of the parameters described in equation (5) calculated from the experiment values of the different fluid level in syringe.

IV. CONCLUSIONS

We present the flash photography method for the measurements of the fluid flow dynamic of a fluid dispensing system. It comprises of two main parts. These include the fluid dispensing system and the flash photography system. The conventional fluid dispensing system used in electronics industries was used to demonstrate the performance of our proposed technique. The flash photography system is specially designed and utilized for visualizing and calculating the volume of the dispensing droplet. The image processing algorithm was used to determine the time-dependent droplet volume and fluid flow rate during the dispensing actuation. The pressure dependent fluid flow curve was constructed from the measurement values, in order to identify the parameters associated with the model described by equation (5). The identified parameters are consistent with the fluid properties of the concentrated syrup used in this study. To assess the influence of the fluid level in syringe, the experiments were performed with different fluid level. The N values of different fluid level show slightly changed. The fluid level in syringe dramatically affects the parameters K_1, K_2, K_3 , thereby changing the fluid volume dispensed.

ACKNOWLEDGMENT

We gratefully acknowledge the NECTEC, WD and College of Data Storage Innovation (DSTAR) of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

REFERENCES

- [1] X.B. Chen " Modeling and control of fluid dispensing processes: a state of the art review", Int. J. Adv. Manuf. Technol. (2009) 43, pp 276-286.
- [2] H. X. Li, J. Liu, C. P. Chen, and H. Deng "A Simple Model-Based Approach for Fluid Dispensing Analysis and Control" IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, (2007) 12, pp 491-503.
- [3] X. B. Chen, W. J. Zhang, G. Schoenau, and B. Surgenor "Off-Line Control of Time-Pressure Dispensing Processes for Electronics Packaging" IEEE trans on Elec. Pack. Manu., (2003) vol. 26, no. 4, pp 286-293.
- [4] R.P. Chhabra, J.F. Richardson, " Non-Newtonian flow in the process industries: fundamental and engineering applications" 1st edn, Butterworth-Heinemann, UK.
- [5] K. Thurow, T. Kruger and N. Stoll, " An optical approach for the determination of droplet volumes in nanodispensing" J. Auto. Meth. Man. In Chem, (2009), 1-10.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาว วรรัตน์ เลิศกิตติวัฒนกุล
วัน เดือน ปี เกิด	วันที่ 8 สิงหาคม พ.ศ. 2528 ต. ยี่ล้น อ.วิเศษฯ จ. อ่างทอง
ที่อยู่	46 หมู่ 1 ต. ยี่ล้น อ.วิเศษฯ จ. อ่างทอง 14110 kikkok080828@gmail.com
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบัน กำลังศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนวิจัย	สำนักวิจัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลและการประยุกต์ใช้งาน (DSTAR) ร่วมกับศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)
ผลงานการวิจัย	A 3D Model for a Solder Joint Bridging Effect in HGA manufacturing: Simulation and Validation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้