

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 การวัดความดันในระบบ

วิธีการที่เลือกใช้ในการวัดความดันในงานวิจัยนี้ ใช้ 2 วิธีการเปรียบเทียบกับกันดังนี้

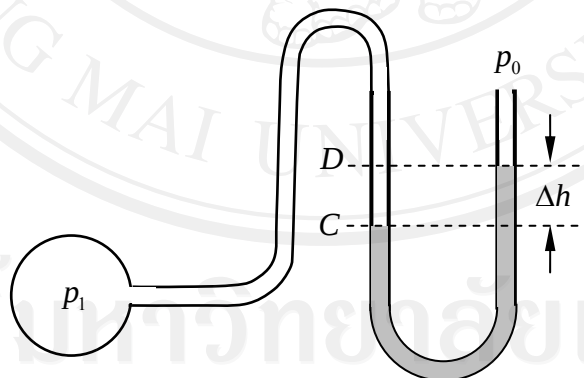
3.1.1 เครื่องวัดความดันแบบปรอท(mercury manometer)

การวัดความดันด้วยเครื่องวัดความดันแบบปรอทเป็นวิธีดั้งเดิมที่มีการใช้มานานแล้วแต่ยังคงมีประสิทธิภาพดี เนื่องจากสร้างได้ง่ายไม่ซับซ้อนเพียงอาศัยหลักการการต่อเชื่อมแรงดันในท่อ ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งผลต่างความดัน ของปลายทั้งสองข้างสามารถอ่านค่าผลต่างความสูงเป็นมิลลิเมตรปรอท(mmHg) ได้โดยตรง จากหลักที่ว่าความดันแก๊สที่สถานะสมดุลเท่ากันทุกจุด หรือแทบไม่ขึ้นกับความสูงมาก และจากนิยามความดัน $p = F / A$ และกฎข้อที่สองของนิวตัน จะได้ว่า

$$p_0 + \rho g \Delta h = p_1 \quad (3.1)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \Delta p = \rho g \Delta h \quad (3.2)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของปรอท $13546.2 \text{ kg.m}^{-3}$ และ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

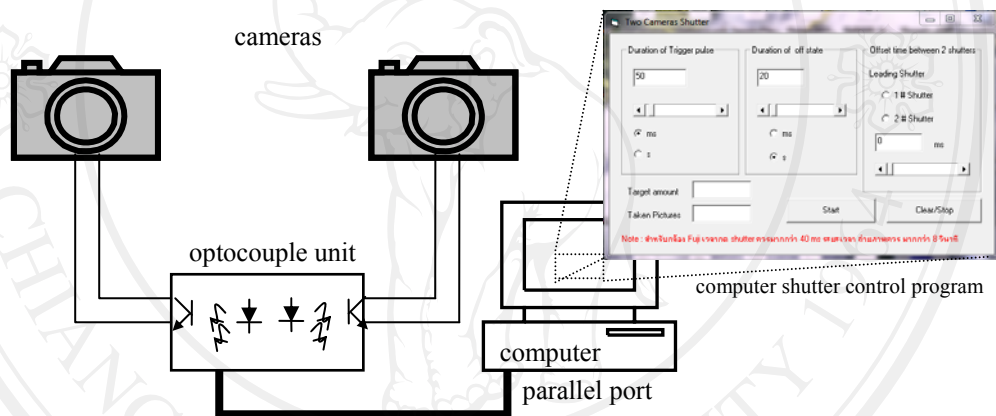


รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีอ่านค่าความดันจากมานอมิเตอร์ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ (3.2)

แม้ว่าการวัดความดันในมานอมิเตอร์แบบปรอทจะสร้างและอ่านค่าได้ง่าย แต่ก็มีข้อที่พึงระวัง เช่น วิธีการอ่านระดับความสูงให้แม่นยำ การวางมานอมิเตอร์ให้ได้แนวระดับ การได้รับอันตรายจากไอปรอท และการสูญเสียปริมาตรของไหลเข้ามาในตัวมานอมิเตอร์ ที่รับกวนระบบ (Fraden, 2003)

3.1.2 การอ่านค่าความดันที่เวลาต่างๆ จากमानอมิเตอร์

การใช้मानอมิเตอร์มากกว่า 1 ตัว สำหรับการวัดความดันที่มีการเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ของไหลไหลไปในท่อขณะทำการทดลองที่เวลาต่างๆ พร้อมกันนั้นไม่สามารถทำได้ง่ายนัก ดังนั้นจึงต้องใช้การบันทึกภาพระดับความสูงของमानอมิเตอร์แต่ละตัวอย่างพร้อมเพรียงกัน ซึ่งสามารถทำได้โดยการดัดแปลงกล้องถ่ายรูป ดิจิตอล ที่มีอยู่ (Sony cybershot, Canon IXUS65, Fuji finepix E510) ให้สามารถกดชัตเตอร์ (shutter) ถ่ายภาพได้พร้อมกันโดยใช้สัญญาณลั่นไก (trigger signal) จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สั่งงานมาใช้กดชัตเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ผ่านทางพอร์ตขนานของคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยอุปกรณ์ ตัวเชื่อมต่อแสง (optocoupler) ที่เวลาคงที่ซึ่งอ้างอิงจากฐานเวลาในคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้มีแผนภาพการควบคุมสั่งการดังแสดงในรูปที่ 3.2 และแสดงภาพตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 แสดงระบบที่ใช้ถ่ายภาพ ซึ่งควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

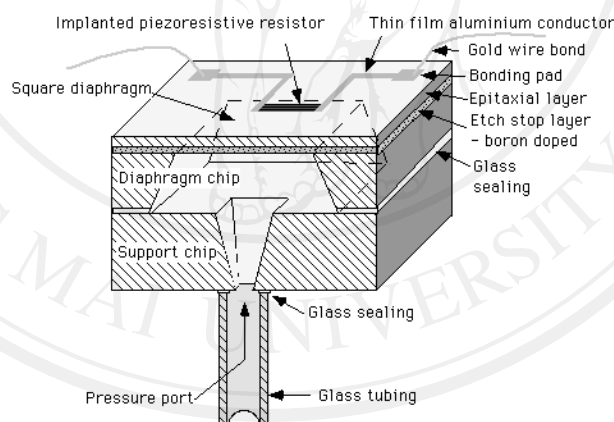


รูปที่ 3.3 แสดงภาพตัวอย่างที่ถ่ายได้ จากกล้องถ่ายรูป ทั้งสองกล้อง

จากรูปกล้องแรกใช้ถ่ายระดับปรอท ในมานอมิเตอร์ทั้งสองตัว(ด้านซ้ายของรูป) ซึ่งใช้วัดความดันทางขาเข้าและออกที่วางอยู่ทางด้านซ้ายและขวา และในขณะเดียวกัน กล้องตัวที่สองใช้ถ่ายภาพระดับน้ำที่ต่อออกมาจากท่อซึ่งตั้งฉากกับท่อทางเข้าและออก ของไมโครเซนแนลโดยต่อเข้ากับมานอ-มิเตอร์ทั้งสองตัวตามลำดับ (ด้านขวาของรูป)

3.1.3 เครื่องวัดความดันจากความต้านทานพิยโซ

เครื่องวัดชนิดนี้ ใช้หลักการทำงานของสารประเภท piezoresistive ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนกับแรงเค้นในตัววัสดุ (Kurtz and Gravel, 1967) โดยปกติสารที่มีสมบัตินี้คือ แผ่นผลึกเชิงเดี่ยว(single crystal)ของธาตุซิลิกอนบางซึ่งถูกโด๊ปให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) หรือชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานที่แปรค่าความต้านทานโดยแรงเค้น เนื่องจากมีคุณสมบัติยืดหยุ่นที่ดีเมื่อทำให้เป็นแผ่นบาง ไม่มีการลึบคลานของประจุผ่านตัวสาร ไม่มีสมบัติฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ภายใต้อุณหภูมิสูงๆ (Tuft et al., 1962) ลักษณะภายในของตัวตรวจวัดแบบที่คล้ายกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างภายในของตัวตรวจวัดความดันจาก pressure port จะทำให้เกิดแรง

เค้นบนแผ่นซิลิกอน และทำให้ค่าความต้านทานของ Implanted piezoresistive resistor เปลี่ยนแปลงไป(Halbo and Ohlckers, 1995)

สำหรับการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานจะใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ ผ่าน gold wire bond โดยอาจลดผลของความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ด้วยวงจร Wheatstone bridge (Tanigawa et. al., 1985) ซึ่งตัวต้านทานตัวอื่นไม่ได้อยู่บนแผ่น diaphragm

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัววัดความดันสัมบูรณ์ (absolute pressure sensor) เบอร์ SMD085 แบบบัดกรีติดบนพื้นผิว (surface mount) ของ (Bosch Sensor Tech GmbH,2005) มีลักษณะดังรูปที่ 3.5 สำหรับรายละเอียดดูที่ http://www.bosch-sensortec.com/content/language1/downloads/SMD085_V1_1105.pdf



รูปที่ 3.5 ตัววัดความดันเบอร์ SMD 085 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (Bosch Sensor Tech GmbH,2005)

สำหรับค่าความดันที่วัดได้จะต้องแปรผลจากค่าสัญญาณอะนาล็อก (analog signal) ที่ได้จากเอาต์พุต (output) ของตัวเซนเซอร์ ซึ่งต่างจากตัววัดความดันบางรุ่นที่สามารถให้ค่าความดันออกมาเป็นสัญญาณดิจิทัลได้ทันที สาเหตุที่เลือกใช้ตัววัดความดันแบบอะนาล็อกเนื่องจากสามารถตรวจสอบความผิดปกติ ของสัญญาณได้ และสามารถออกแบบให้ปรับความละเอียดของช่วงการวัดได้

สัญญาณที่ได้จากตัววัดความดันจะอยู่ในรูปความต่างศักย์ ซึ่งถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลหรือที่เรียกว่า quantization ให้อยู่ในรูปของค่าตัวเลข แล้วแสดงผลเป็นความดันผ่านฟังก์ชันการแปลงเชิงเส้น แล้วส่งออกมายังคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บค่าความดันที่เวลาต่างๆ เพื่อศึกษาการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของความดันในระบบ จะใช้วงจรรวม (IC) แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอะนาล็อก (analog to digital convertor :ADC) เบอร์ LTC1298CN ของ Linear Tech (1994) สำหรับตัววงจรได้ออกแบบและปรับปรุง ให้มีย่านการวัดที่ละเอียดขึ้น และสามารถตั้งค่าสอบเทียบได้จากการกดปุ่มตั้งค่าของเครื่องวัดได้ ดังรูปที่ 3.7

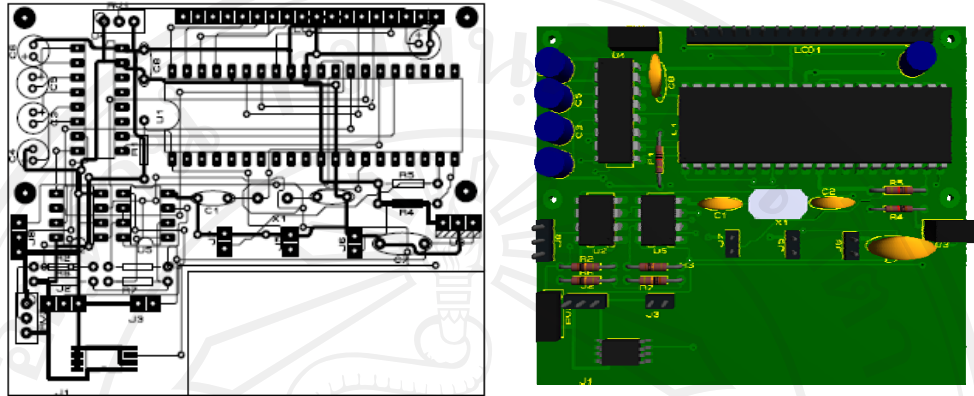
หลักการทำงานของวงจรทั้งหมด เริ่มจากเมื่อเปิดสวิตช์วงจร ซึ่งต่อกับแบตเตอรี่ 9V วงจรรวมหรือ IC เบอร์ 7805 จะทำหน้าที่ปรับแรงดันให้มีค่าคงที่ 5V โดยมี C7 และ C8 เป็นตัวกรองสัญญาณความถี่สูงและเพิ่มเสถียรภาพของการจ่ายพลังงานให้กับวงจร ความต่างศักย์ 5V นี้จะถูกจ่ายให้ IC SMD 085 LM358 LTC1298 MAX232 และ LCD โดยอุปกรณ์แต่ละตัวจะทำหน้าที่ใน

วงจรตามลำดับดังนี้ SMD 085 จะเปลี่ยนค่าความดันในบรรยากาศเป็นค่าความต่างศักย์ที่ขา 3 โดยปริมาณทั้งสองจะแปรผันตรงกัน จากนั้นออปแอมป์ตัวหนึ่งใน IC LM358 (U5:B) จะทำหน้าที่เป็น บัฟเฟอร์ (buffer) หรือ voltage follower เพื่อป้องกันไม่ให้ค่าแรงดันที่ขาออกของ SMD 085 ต่ำลง เนื่องจากการต่อกับโหลดอื่นที่มีความต้านทานภายในน้อย จากนั้น U5:A (ดูรูปที่ 3.7) จะทำหน้าที่ ขยายแรงดันขึ้นเป็นสองเท่า โดยจะเริ่มขยายแรงดันเมื่อแรงดันเกิน 2.5V ซึ่งอ้างอิงโดยอัตราส่วน ของ R6 และ R7 ที่มีความคลาดเคลื่อน 1% จากนั้นสัญญาณที่ถูกขยายแล้วจะ ถูกเปลี่ยนเป็น สัญญาณดิจิทัลด้วย IC LTC1298 ที่พอหาได้ในท้องตลาด โดยความละเอียดในการแปลงสัญญาณ เป็น 12 bit หมายถึง สามารถแบ่งระดับสัญญาณหรือแรงดัน จากค่าแรงดันมากที่สุด 5V ได้ระดับละ 0.00122 mV ซึ่งมี $2^{12}-1$ ระดับ แต่เมื่อรวมผลของการขยายแรงดัน 2 เท่าจาก LM358 เข้าด้วยกัน แล้ว ความละเอียดที่วัดได้จริงจะกลายเป็น 0.0006 mV ซึ่งท้ายที่สุดจะทำให้วัดค่าความดันได้ ละเอียดในระดับ 1/10 มิลลิเมตรปรอท ที่ขา 5 การแปลงสัญญาณอะนาล็อก(analog) เป็นสัญญาณ ดิจิตอลโดย LTC 1298 นั้นจะถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877A ซึ่งเป็นหัวใจ ของระบบ โดยสาเหตุที่เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดนี้ซึ่งมีขนาดใหญ่ และยังมีถึง 40 ขานั้น เพราะ PIC 16F877A มีพอร์ต(port) และหน่วยความจำอย่างพอเพียง สำหรับการควบคุมระบบ ดังกล่าว และยังหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด LTC 1298 จะถูกควบคุมการสุ่มวัดค่าความต่างศักย์ด้วย สัญญาณจาก Port D ของ IC ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877A ซึ่งกำหนดความเร็วในการ ประมวลผลจากสัญญาณนาฬิกาด้วยคริสตัลออสซิลเลเตอร์ (Crystal resonator) X1 ที่ความถี่ 20 MHz

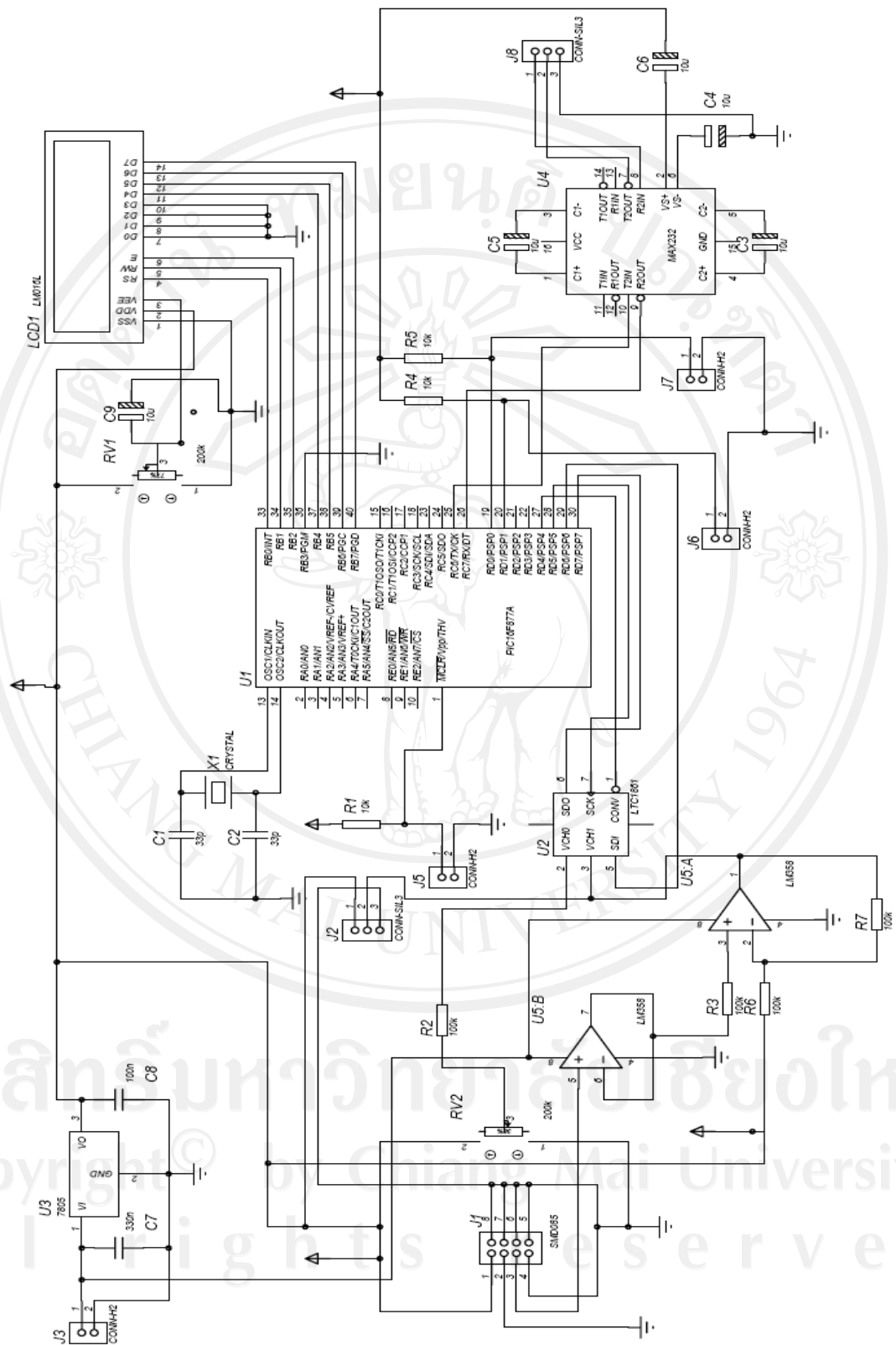
ส่วนการเลือกชุดโปรแกรมนี้จะอาศัยการวนรับค่าสถานะ 0 จาก PORT D โดยอ่านค่า สถานะจาก ปุ่ม J6 และ J7 ซึ่งต่อกับตัวต้านทาน R4 และ R5 เมื่อกดปุ่มใดสถานะจะเปลี่ยนเป็นศูนย์ เมื่อนั้น ส่วนการส่งค่าไปยังคอมพิวเตอร์จะใช้ PORT C ส่งข้อมูลแบบอนุกรมไปยัง IC MAX232 ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนุกรมที่ PORT C นี้ให้เป็นสัญญาณมาตรฐาน RS232 โดยกำหนดให้ ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ มีอัตราการรับส่งข้อมูล (baud rate) 9600 ด้วยอัตราคงที่ ซึ่งสามารถ สื่อสารกับคอมพิวเตอร์โดยใช้ PORT RS232

สำหรับการแสดงผลทาง LCD 16×2 ตัวอักษรนั้น ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูก กำหนดให้ใช้ PORT B ตามมาตรฐานโดยสามารถปรับความเข้มของตัวอักษรด้วยการหมุนปรับตัว ต้านทานปรับค่าได้ RV1 อุปกรณ์ที่เหลือนั้นเช่นสวิทช์ J5 ที่ต่อกับขา 1 ของไมโครคอนโทรลเลอร์จะ ใช้สำหรับการเริ่มต้นอ่านโปรแกรมใหม่ สำหรับ J2 จะใช้เป็นจุดต่อเพื่อตรวจสอบค่าแรงดันใน วงจร ทำนองเดียวกันกับ RV2 ซึ่งใช้เพื่อตรวจสอบการแปลงค่าแรงดันให้เป็นตัวเลขดิจิทัล และ เหลือไว้สำหรับการพัฒนาการตรวจสอบสถานะแบตเตอรี่เช่นเตือนเมื่อระดับแรงดันต่ำเกินไปซึ่งจะ ทำให้วัดได้ไม่ถูกต้อง

ตัวอุปกรณ์ทุกชิ้นจะถูกบัดกรีลงบนแผ่นวงจร (printed circuit board: PCB) ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งมีลายวงจรสองด้านเพื่อให้เครื่องวัดมีขนาดเล็กกระทัดรัดขึ้น ซึ่งหากพัฒนาให้เครื่องวัดมีขนาดเล็กลงอีกก็เพียงใช้ชิปที่ตัวถังชนิดติดพื้นผิว (surface mount) และออกแบบแผ่น PCB ใหม่



รูปที่ 3.6 รูปแผ่นวงจรสองหน้าที่ออกแบบสำหรับใช้เป็นตัววัดความดัน

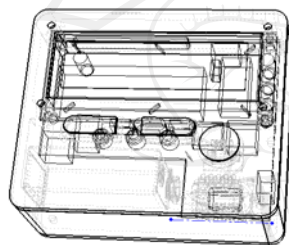


รูปที่ 3.7 วงจรอ่านค่าความดันด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A

(Microchip Technology Inc ,2003)

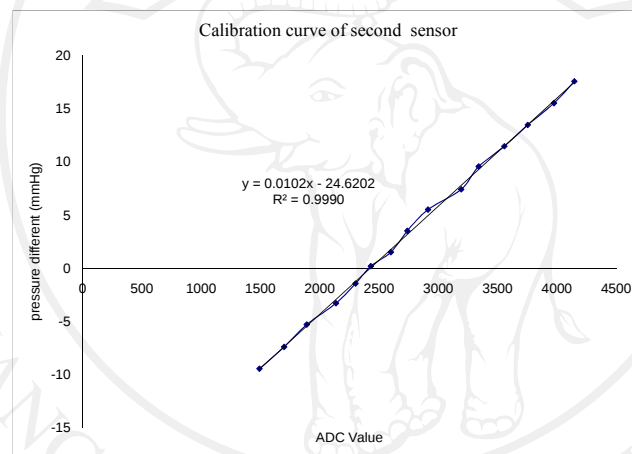
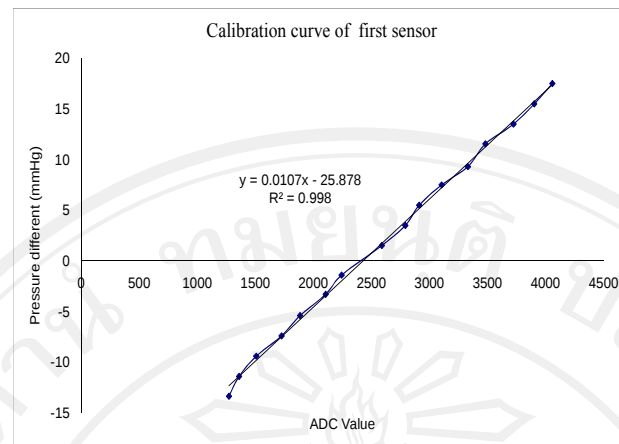
ส่วนตัวโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่เขียนด้วยภาษา C ซึ่งภายหลังถูกแปลงเป็นภาษาเครื่องฐาน 16 แล้วโปรแกรมลงบนตัว ไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับตัวโปรแกรมนั้นสามารถตรวจสอบการทำงานได้ที่ภาคผนวก ข ซึ่งเขียนขึ้นตามจุดประสงค์ การใช้งานดังนี้

1. สามารถอ่านค่าความดันเป็นมิลลิเมตรปรอทจากหน้าจอ LCD ได้หรืออ่านค่าจากจอ LCD พร้อมกับส่งค่าออกทางพอร์ต RS 232 เพื่อเก็บค่าในคอมพิวเตอร์ได้
2. สามารถแสดงผลความดันหรือ ความสูงจากจุดอ้างอิงใดๆได้
3. สามารถสอบเทียบโดยใช้โปรแกรมจดจำค่ามาตรฐานไว้ในหน่วยความจำของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ณ จุดสอบเทียบ



รูปที่ 3.8 รูปซ้ายแสดงโครงสร้างของตัววัดความดันที่ออกแบบไว้โดยใช้แหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่ 9V และรูปขวาแสดงภาพถ่ายตัววัดความดันที่ประกอบเสร็จ

หลังจากทำการประกอบเครื่องวัดความดันแล้ว จึงตรวจสอบผลการทำงานของวงจรของเครื่องอ่านค่าความดันทั้งสองตัว ค่า ADC ที่อ่านได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ต้องแปรผันกับค่าผลต่างความดัน ดังนั้นจึงทดลองอ่านค่า ADC เทียบกับค่าผลต่างความดันที่อ่านได้จากมานอมิเตอร์ ซึ่งต่อเข้ากับแหล่งจ่ายความดันเดียวกัน โดยใช้กระบอกฉีดยาอัดอากาศ ในระบบปิดซึ่งต่อเข้ากับเครื่องวัดทั้งสอง จากนั้นจึงทำการสอบเทียบกับผลต่างความดันที่อ่านได้จากมานอมิเตอร์แบบปรอทที่ระยะความสูงต่างๆ กับค่า ADC ที่อ่านได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ผลการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ผลการสอบเทียบเครื่องวัดความดันทั้งสองที่ใช้ในการทดลองนี้ เพื่อใช้หาค่าความชันของกราฟหรือค่าคงที่การแปรผัน m ในฟังก์ชันการแปลงสมการ(3.1)

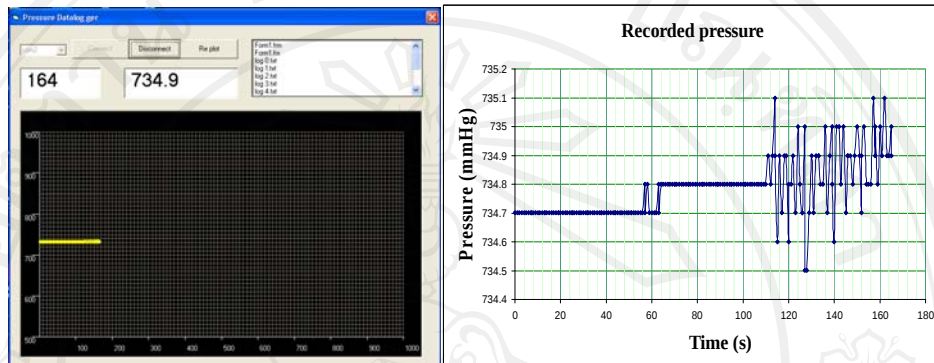
สมการเชิงเส้นที่เป็นฟังก์ชันการแปลงคือ

$$p = m(ADC) + p_0 \quad (3.1)$$

โดยที่ค่าคงที่การแปรผัน m ของเครื่องวัดแต่ละเครื่องจะถูกบันทึกลงไปพร้อมกับการโปรแกรมตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนค่า p_0 นี้จะได้จากการคำนวณซึ่งเกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยการสั่งงานจากโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยอัตโนมัติ (automatic evaluation) เมื่ออยู่ใน calibration mode ซึ่งเข้าใช้งานได้เมื่อกดปุ่ม ตรงกลางทั้งสองปุ่มพร้อมกัน แล้วกดปุ่มทางซ้ายและขวาเพื่อเพิ่มและลดค่าความดันให้เท่ากับค่าความดันบรรยากาศที่อ่านได้ในขณะนั้น

3.1.4 การอ่านค่าความดันจากเครื่องวัดความดันจากความต้านทานเพียโซ

การอ่านและบันทึกค่าความดันจากเครื่องวัดความดันเป็นเรื่องไม่ยุ่งยากเท่าการอ่านค่าความดันจากมานอมิเตอร์ เพราะสามารถอ่านค่า/แสดงค่าที่เป็นตัวเลข และบันทึกค่าเก็บไว้เป็นไฟล์อักขระ(.txt) ได้โดยตรง นอกจากนี้ยังสามารถอ่านค่าความดันได้ทุกๆวินาที หรือน้อยกว่าซึ่งขึ้นอยู่กับ การปรับแต่งค่าเวลาในตัวโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.10 ซ้ายโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อรับค่าความดันจากเครื่องวัดความดันที่สร้างขึ้น ขวากราฟของข้อมูลความดันซึ่งบันทึกค่าไว้ได้ทุกๆวินาทีโดยมีความละเอียดในระดับ 0.1 มิลลิเมตรปรอท

สำหรับตัวโปรแกรมที่เขียนขึ้นสามารถใช้ได้กับระบบปฏิบัติการ Window XP, Window Vista, Window 7 โดยติดตั้งจาก package ถ้าเรีจรูปในแผ่น CD โดยมีขั้นตอนใช้งาน ดังนี้

- 1.ต่อสายเคเบิลเชื่อมต่อ พอร์ตอนุกรม RS232 เข้ากับคอมพิวเตอร์และตัวเครื่องวัด
- 2.เปิดตัวโปรแกรม แล้วเลือกพอร์ตสำหรับต่อเชื่อมกับเครื่องวัดความดัน
- 3.คลิกที่ connect เพื่อเชื่อมต่อ ตัวโปรแกรมจะเริ่มบันทึกค่าเวลาและความดันไว้ในคอมพิวเตอร์ โดยอัตโนมัติ ไฟล์จะถูกตั้งชื่อว่า log + ลำดับที่ของไฟล์ .txt ใน directory ที่โปรแกรมถูกติดตั้งอยู่
- 4.เมื่อต้องการล้างการเขียนกราฟใหม่หรือเริ่มกราฟที่เวลา $t = 0$ ทำได้โดยคลิกที่ปุ่ม clear
- 5.เมื่อจะหยุดการบันทึกค่า คลิกที่ปุ่ม disconnect จึงสามารถปิดโปรแกรมได้โดยข้อมูลไม่สูญหาย
6. เมื่อจะปิดโปรแกรมให้คลิกที่ ปุ่มกากบาทบริเวณมุมบนขวา

3.2 การวัดอัตราการไหลในระบบ

อัตราการไหล Q ที่กล่าวถึงในงานวิจัยนี้จะเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตร (volumetric flow rate) ซึ่งเป็นปริมาตรต่อหน่วยเวลา และเนื่องจากความหนาแน่นของของไหลบีบอัดไม่ได้มีค่าคงที่ จึงสามารถวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตร จากการวัดอัตราการไหลเชิงมวล Q_m ได้ โดย

$$Q = \frac{Q_m}{\rho} \quad (3.2)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของของไหล ดังนั้นการวัดอัตราการไหลจึงสามารถวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของทั้งมวลและปริมาตรต่อเวลาได้โดยอาศัยสมการ (3.2)

3.2.1 การวัดอัตราการไหลโดยวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อเวลา

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในงานวิจัยนี้การวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตร จะใช้ การถ่ายภาพและวัดระยะทาง เพื่อหาความเร็วเฉลี่ย $\bar{V}$ ในการเคลื่อนที่ของของไหลในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ โดยวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของผิวบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำกับอากาศในท่อ แล้วหารด้วยเวลาที่ทำการถ่ายภาพในแต่ละภาพ จากกฎการอนุรักษ์มวลซึ่ง คิดได้ว่าปริมาณของไหลที่เข้าและออกจากระบบคงที่ จึงสามารถวัดอัตราการไหลได้จาก

$$Q = A\bar{V} = A \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.2)$$

เมื่อ Q คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร (volumetric flow rate)

A คือพื้นที่หน้าตัดคงที่ของท่อ

Δx คือผลต่างระยะทางที่เวลาสุดท้าย t_f กับระยะทางที่เวลาเริ่มต้น t_i หรือ $x(t_f) - x(t_i)$

Δt คือผลต่างระยะเวลา t_f กับ t_i โดยในที่นี้คือระยะเวลาคงที่ ซึ่งกำหนดโดยคาบของการถ่ายภาพในแต่ละภาพ

3.2.2 การวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลต่อเวลา

การวัดการไหลในกรณีนี้จะใช้วัดอัตราการไหล ในการทดลองเบื้องต้น และสอบเทียบอุปกรณ์ ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากการวัดมวลหรือน้ำหนักที่เวลาใดๆ นั้นทำได้ยากและไม่สามารถติดตามพลวัต (dynamic) ของระบบได้อย่างต่อเนื่องเท่ากับวิธีการแรก เนื่องจากการวัดมวลปริมาตรน้อยๆ ที่ผลต่างเวลาน้อยๆ โดยใช้เครื่องชั่งทั่วไปกระทำได้ยากและมีโอกาสผิดพลาดสูงสำหรับการวัดอัตราการไหลที่ผลต่างเวลาน้อยๆ จึงอาจต้องใช้เครื่องชั่งที่สามารถอ่านค่าน้ำหนักน้อยๆ ที่เวลาใดๆ ได้เช่นเครื่องชั่งดิจิทัล (digital balance) ที่มีฟังก์ชันส่งค่ากลับมายังคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถบันทึกค่าน้ำหนักได้ทันทีที่เวลาน้อยๆ ซึ่งจะสามารถวัดอัตราการไหลที่เวลาใดๆ ได้อย่างถูกต้องเหมาะกับการศึกษาพลวัตของระบบ

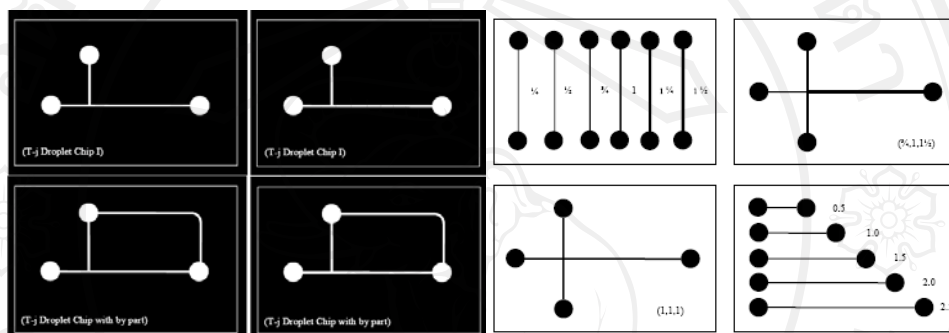
3.3 การสร้างไมโครเซนแนล ด้วยเทคนิค EWBT

ไมโครเซนแนลหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สร้างจากเทคนิค (Etched Wiring Board Technique: EWBT) ของ Singkarat et. al. (2009) ซึ่งคิดค้นได้ในหน่วยวิจัย ไมโครฟลูอิดิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ วิธีการดังกล่าวจัดอยู่ในกลุ่ม soft lithography โดยอาศัยการใช้แม่พิมพ์ทำจาก PCB (printed circuit board) โดยการสร้างไมโครเซนแนล ซึ่งถอดแบบลงบน Polydimethylsiloxane:PDMS (SYLGARD® 184 SILICONE ELASTOMER KIT) ซึ่งเป็นสารซิลิโคนใส ในที่สุดจะได้ ไมโครฟลูอิดิกชิป (microfluidics chip) แล้วประกบลงบนฟิล์ม PDMS ที่

ยังเหนียวอยู่ และรอจนซิลิโคนแข็งตัว สำหรับขั้นตอนโดยละเอียด ได้อธิบายประกอบกับรูปที่ 3.12 ดังต่อไปนี้

3.3.1 เขียนแบบรูปร่างโครงข่ายไมโครฟลูอิดิกชิป

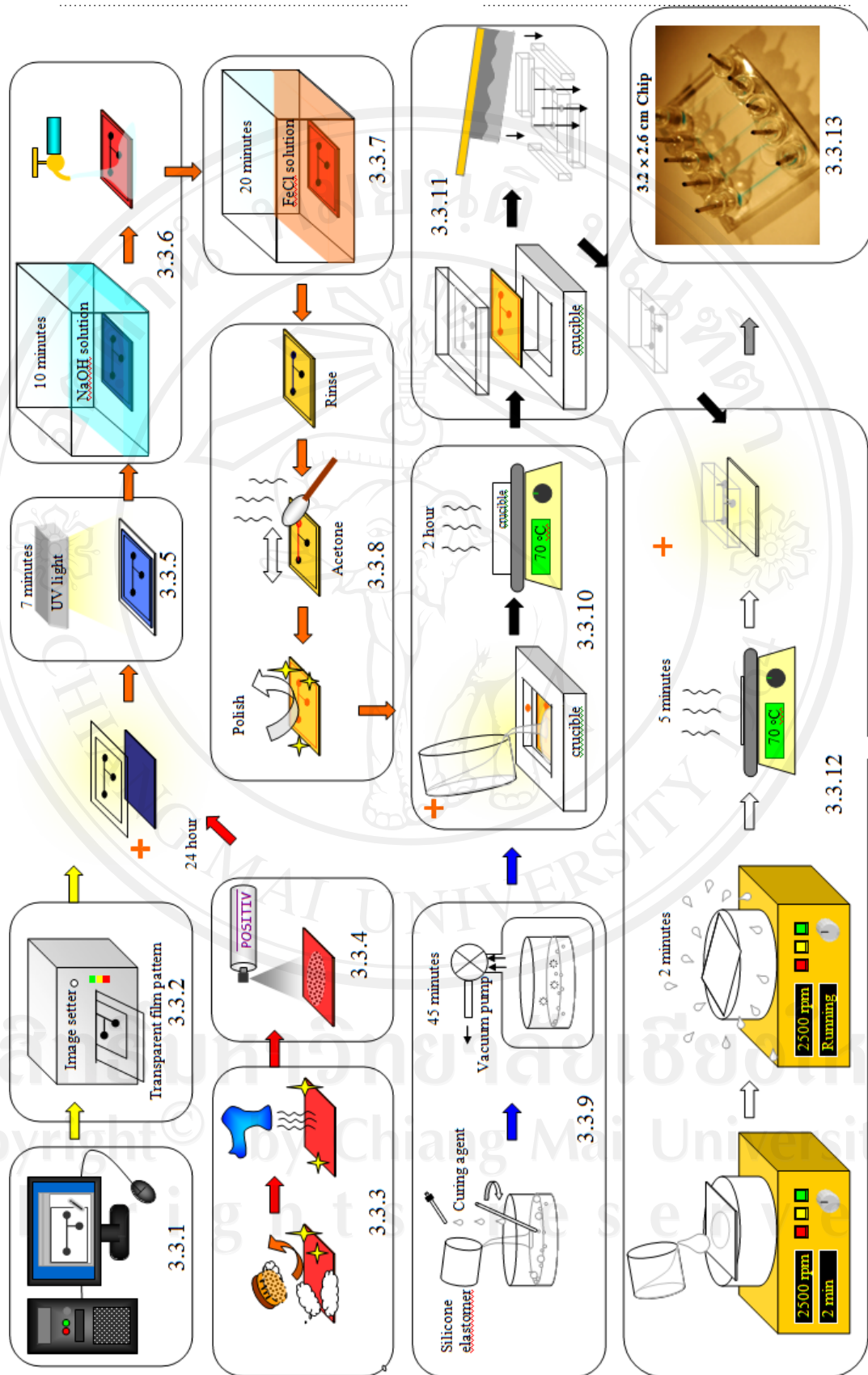
การเขียนแบบรูปร่างของโครงข่ายไมโครเซนแนล สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่มีลิขสิทธิ์ซึ่งสามารถวาดภาพแบบเวกเตอร์ได้ เช่น Microsoft Office, Microsoft Visio, Adobe Illustrator, Corel Draw ฯลฯ หรือโปรแกรมแจกฟรี เช่น Inkscape เป็นต้น ลักษณะของแบบที่เขียนได้ แสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ภาพตัวอย่างฟิล์มแม่แบบไมโครเซนแนลที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ภาพครึ่งซ้ายของรูปที่ 3.11 เป็นฟิล์มต้นแบบสำหรับการสร้างแม่แบบด้วยฟิล์มไวแสงชนิดลบ (negative photosensitive) โดยสารเคมีส่วนที่ทำปฏิกิริยากับแสงซึ่งทะลุผ่านฟิล์มแม่แบบไปยังชั้นฟิล์มไวแสงจะไม่ถูกชะล้างออกเมื่อล้างออกด้วยตัวทำละลายฟิล์มไวแสง (developer)

ส่วนรูปที่ครึ่งขวามือเป็นฟิล์มสำหรับการสร้างแม่แบบด้วยฟิล์มไวแสงชนิดบวก (positive photosensitive) สารเคมีส่วนที่ทำปฏิกิริยากับแสงซึ่งทะลุผ่านฟิล์มแม่แบบไปยังฟิล์มไวแสงจะถูกชะล้างออก จากผิวหน้าแผ่นทองแดง เมื่อล้างออกด้วยสารละลายฟิล์มไวแสง (developer)



รูปที่ 3.12 แผนผังขั้นตอนการทำไมโครเซนแนลบนไมโครฟลูอิดิกชิป

3.3.2 ทำฟิล์มแม่แบบสำหรับทำแม่แบบหล่อซิลิโคน

สำหรับการทำฟิล์มต้นแบบ EWBT สามารถทำได้มากกว่า 2 วิธี วิธีหลักที่ใช้ในการทดลองนี้ คือการนำไฟล์ภาพที่เตรียมไว้ในรูปที่ 3.11 ไปถ่ายฟิล์มด้วยเทคนิค Film Imagesetters ที่โรงพิมพ์ หรือพิมพ์ภาพแม่แบบลงบนแผ่นใสด้วยเครื่องพิมพ์ความละเอียดสูงตามร้านถ่ายเอกสาร ซึ่งมีความคมชัดของขอบภาพน้อยกว่าเทคนิค Film Imagesetters

3.3.3 เตรียมพื้นผิวแผ่น PCB

การเตรียมพื้นผิวของแผ่นทองแดงเป็นกระบวนการสำคัญอย่างหนึ่ง เพื่อให้สามารถเคลือบน้ำยาไวแสงได้เป็นเนื้อเดียวกัน และมีความหนาสม่ำเสมอ จึงต้องล้างทำความสะอาดแผ่น PCB เพื่อขจัดคราบไขมัน ฟุ้ง และสนิมทองแดงบางส่วนออก ด้วยน้ำยาล้างจานหรือผงซักฟอกและ อาจใช้แปรงทองเหลืองขัดผิวเพื่อเอาสนิมทองแดงออก กรณีไม่คำนึงถึงความขรุขระ ที่จะเกิดบนพื้นผิว หรือความหนาของไมโครเซนแนลที่จะลดลงไปของไมโครเซนแนล ซึ่งท้ายที่สุดแล้วสามารถใช้สารขัดผิวให้เรียบมันวาวในภายหลังได้ เมื่อล้างทำความสะอาดเสร็จ จึงเช็ดและผึ่งให้แห้ง อาจใช้เครื่องเป่าลมร้อนช่วยเพื่อให้แห้งไวขึ้น แต่ต้องระวังไม่ใช้ความร้อนมากเกินไปอันจะทำให้แผ่น PCB โกงงอเสียรูป และทองแดงเกิดสนิม

3.3.4 เคลือบ PCB ด้วยสเปรย์แสงหรือฟิล์มไวแสง

ตั้งแต่ขั้นตอนนี้เป็นต้นไปควรสวมถุงมือและหน้ากากสำหรับป้องกันสารระเหยไว้ตลอดเวลา เมื่อเตรียมพื้นผิวของแผ่น PCB เสร็จแล้ว ฉีดพ่นด้วยสเปรย์ไวแสง (POSITIVE 20 KONTAKT CHEMIE) ลงบนด้านที่เป็นทองแดงของแผ่น PCB ให้ทั่วในที่สะอาดและปลอดฝุ่น เนื่องจากฝุ่นที่เกาะอยู่บนแผ่น PCB อาจทำให้รูปร่างของไมโครเซนแนล ขาดหรือเกินไปจากแบบหลังจากล้างฟิล์มส่วนที่โดนแสงออก

การฉีดสเปรย์จะวางแผ่น PCB ในแนวราบไปกับพื้น โดยมีระยะห่างระหว่างหัวฉีด กับแผ่น PCB ประมาณ 20 เซนติเมตรโดยพ่นซิกแซกเป็นฟันปลาให้ทั่วถึง หากพ่นสเปรย์ในระยะที่ใกล้เกินไปน้ำยาจะรวมกลุ่มกันบริเวณกลางแผ่นเนื่องจากผลของแรงดึงดูด ทำให้ความหนาฟิล์มไม่สม่ำเสมอแห้งช้า และหากพ่นสเปรย์ในระยะที่ไกลมากเกินไปก็จะทำให้สิ้นเปลือง และเกิดการฟุ้งกระจายของไอระเหยมากกว่า สำหรับขั้นตอนการฉีดสเปรย์นี้ ไม่จำเป็นต้องทำในที่มืด แต่ก็ไม่ใช้ที่สว่างเกินไปนัก หลังจากนั้นต้องปล่อยสเปรย์ให้แห้งในที่มืดและแห้งที่อุณหภูมิ 20-25 เซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรืออบด้วยอุณหภูมิ 70 เซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

ในกรณีที่ใช้ฟิล์มไวแสงซึ่งหาซื้อได้ตามร้านอิเล็กทรอนิกส์ นั้นเริ่มจากตัดฟิล์มให้ได้ขนาดพอดีแม่แบบที่เตรียมไว้ จากนั้นลอกพลาสติกบางๆ ที่ปิดแผ่นฟิล์มออกเล็กน้อยพอให้มีพื้นที่ติดกับแผ่น PCB ได้ จากนั้นนำฟิล์มมาติดบนแผ่น PCB โดยค่อยๆ ริดฟิล์มไล่ฟองอากาศไปตามแนวใด

แนวหนึ่งพร้อมกับค่อยๆดึงแผ่นพลาสติกออก เพื่อป้องกันฝุ่นที่อาจตกลงไปขณะติดฟิล์ม จากนั้นทำการตรวจสอบบริเวณที่มีฟองอากาศ แล้วใช้เข็มแทงอากาศออก พร้อมกับรีดเบาๆ จากนั้น รีดแผ่นฟิล์มให้ติดกับ PCB โดยใช้เตารีดห่อด้วยผ้าฝ้าย และปรับความร้อนให้น้อยกว่ารีดผ้าฝ้าย 1 ระดับ ค่อยๆรีดโดยระวังไม่ให้ฟิล์มละลายเสียสภาพ จนฟิล์มติดสนิท

3.3.5 คัดลอกลายลงบนฟิล์มไวแสงหรือฉายแสง

ฟิล์มไวแสงทั้งสองชนิดต่างไวในการทำปฏิกิริยากับแสง อัลตราไวโอเลต (ultraviolet : UV) การคัดลอกลายจากฟิล์มต้นแบบจะใช้ ฟิล์มแม่แบบมาวางด้านหน้าแผ่น PCB ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มไวแสงแล้ว โดยให้ฟิล์มแม่แบบแนบกับแผ่น PCB มากที่สุด จากนั้นอาจใช้เครื่องฉายแสง UV หรือแสงแดดเป็นแหล่งกำเนิดแสง UV ได้ ซึ่งระยะเวลาในการฉายแสงขึ้นกับความหนาและความเข้มแสง สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องฉายแสงที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง (Rhode ,2010) โดยใช้ระยะเวลาฉายแสงเป็นเวลา 7-10 นาที และใช้แสงแดดในช่วง 10-14 นาฬิกา เป็นเวลาประมาณ 1 นาที สำหรับการสร้างไมโครฟลูอิดิกชิปในบางการทดลอง

3.3.6 ล้างฟิล์มไวแสงออก

หลังจากผ่านการฉายแสงแล้วจะสังเกตเห็นลายของแม่แบบต่างๆอยู่บนชั้นฟิล์มไวแสง จากนั้น ล้างฟิล์มไวแสงส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยใช้สารละลายโซดาไฟ (sodium hydroxide :NaOH) ในภาชนะที่ไม่ถูกกัดด้วยด่าง โดยค่อยๆ เขย่าให้ฟิล์มละลาย จนได้ลายจากฟิล์มแม่แบบบนแผ่นทองแดง หลังจากนั้นนำไปล้างออกด้วยน้ำสะอาด ที่จะได้แผ่นแม่แบบซึ่งพร้อมจะนำไปกัดเอาทองแดงส่วนเกินออก (Etching)

3.3.7 การกัดกรด

การกัดทองแดงส่วนเกินออกด้วยกรด เนื่องจากสารไวแสงซึ่งใช้ทำฟิล์มทนทานต่อกรดได้หลายชนิด เช่น ferric chloride , ammonium persulphate ,กรดใช้ล้างแก้ว (chromic acid) และ กรดกัดแก้ว (hydrofluoric acid) หรือแม้กระทั่งส่วนผสมแนะนำจาก KONTAKT CHEMIE ที่มีส่วนผสมตามปริมาตรดังนี้ 200 ml hydrochloric acid (HCL 35%), 30 ml hydrogenperoxide (H_2O_2 30%), 770 ml water (H_2O) และหากใช้ ferric chloride อัตราส่วนที่แนะนำสำหรับการกัดคือ 35 - 40 %w/w ที่อุณหภูมิ 45 เซลเซียส(KONTAKT CHEMIE,2004)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารละลาย ferric chloride กัดลายวงจรที่อุณหภูมิห้องสองวิธีการ โดยวิธีแรก เทสารละลายกรดเข้มข้นประมาณ 30-40% ลงในภาชนะพลาสติกแล้วนำ แผ่น PCB จาก หัวข้อ 3.3.6 วางคว่ำหน้าลงในภาชนะแล้วเขย่าเป็นระยะเวลาประมาณ 15- 30 นาที จนกระทั่งผิวทองแดงถูกกัดออกจนเหลือลายตามฟิล์มแม่แบบ สำหรับวิธีที่สองจะทำการกัดกรดในอ่างบ่มฟองอากาศควบคุมอุณหภูมิ โดยอัตราส่วนคล้ายกัน ซึ่งผลแตกต่างระหว่างสองวิธีการคือความเร็ว

ในการกัดโดยวิธีที่สองจะสามารถกัดได้เร็วกว่าวิธีแรก 5-10 นาทีทั้งนี้ขึ้นกับความหนาของแผ่นทองแดง แต่วิธีที่สองมักกัดพื้นผิวได้ไม่สม่ำเสมอทั่วแผ่น เมื่อพิจารณาถึงความขรุขระของบริเวณที่เป็นเส้นของลายต้นแบบ จากการตรวจสอบเบื้องต้น พบว่าไม่ต่างกันมากนัก และการกัดลายเส้นที่ยาวมากๆ มีแนวโน้มถูกกัดจนบริเวณกลางเส้นคอดมากที่สุดประมาณ 10% และขนาดของลายเส้นเล็กที่สุดซึ่งทำได้จะกว้างประมาณ 100 ไมโครเมตร

สำหรับการกำจัดของเสียสารเคมี ferric chloride ทำได้โดยการเติม calcium ลงไปซ้ำๆ (washing soda crystals หรือ soda ash) จนกระทั่งหมดฟอง (และค่า ph ถึง 7) ที่จุดนี้สารละลายจะเป็นธรรมชาติและสามารถกำจัดทิ้งได้อย่างปลอดภัย (Wadsin Din Pun academy, 2010)

3.3.8 การล้างทำความสะอาดแม่แบบ

การทำความสะอาดเอาชั้นฟิล์มที่ปิดอยู่บนลายทองแดงออกสามารถใช้สารจำพวกคีโตน (Ketone) เช่น อะซิโตน (Acetone) ละลายชั้นฟิล์มที่ปิดอยู่ออกได้ หรือกรณีที่ไม่มีสารละลายอะซิโตนบริสุทธิ์สามารถใช้ยาล้างเล็บที่มีส่วนผสมของอะซิโตนแทนได้โดยใช้สำลีจุ่มลงในสารละลาย แล้วเช็ดออก เมื่อต้องการให้ผิวด้านบนของแม่แบบเรียบ จะใช้ผงขัดโลหะที่มีขายทั่วไปมาช่วยขัดได้ โดยใช้ผ้าฝ้ายเรียบปูพื้น แล้วบีบผงขัดลงบนผ้าเล็กน้อย แล้วคว่ำแม่แบบที่มีลายลงบนผ้าแล้ว ขัดเบาๆ โดยการขัดจะต้องระวังไม่กดน้ำหนักแรงจนเกินไปซึ่งมีผลทำให้ขอบของลายถูกขัดออกและเสียระนาบ เมื่อขัดเสร็จแล้วล้างทำความสะอาดแม่แบบอีกครั้งด้วยแอลกอฮอล์ เช็ดด้วยผ้าที่ลื่นไม่มีฝุ่นขน แล้วเก็บในกล่องกันฝุ่น ตั้งแต่ขั้นตอนนี้เป็นต้นไป ควรทำการเตรียมในห้องปลอดฝุ่นหรือมีฝุ่นน้อยเพื่อให้กระบวนการประกบไมโครฟลูอิดิกชิป ติดแน่นและใส

3.3.9 การเตรียม PDMS

การเตรียม PDMS สำหรับถอดแบบ จะใช้ส่วนผสมระหว่างซิลิโคนไฮโดรเจน (PDMS agent) กับตัวทำให้แข็ง (curing agent) ในอัตราส่วนน้ำหนัก 1:10 (Sylgard 184 silicone elastomer kit, Dow Corning, Midland, MI) โดยคนให้เข้ากัน แล้วกำจัดฟองที่เกิดขึ้นระหว่างการคนส่วนผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องดูดสุญญากาศ เพื่อให้ PDMS สำหรับถอดแบบมีความใส เหมาะกับการนำไปใช้งาน โดยระยะเวลาในการดูดเอาฟองออกขึ้นกับความแรงของปั๊ม และปริมาณฟองอากาศ

3.3.10 การหล่อไมโครฟลูอิดิกชิป

เมื่อได้แม่แบบลายโครงข่ายไมโครแชนแนลจากหัวข้อ 3.3.8 และได้ PDMS จากหัวข้อ 3.3.9 ซึ่งพร้อมหล่อแบบแล้ว จะหล่อแบบไมโครแชนแนลโดยวางแม่แบบลงในเบ้าโลหะสเตนเลสที่สามารถให้ความร้อนสำหรับการแข็งตัว (curing) ของ PDMS ได้ จากนั้นเปิดเตาควบคุมอุณหภูมิจนอุณหภูมิถึงค่าที่ตั้งไว้แล้วค่อยๆ เท PDMS ลงในเบ้า โดยเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการแข็งตัวมีหลายเงื่อนไข ซึ่งอาจจะใช้อุณหภูมิ 70 เซลเซียส 1 ชั่วโมง หรือที่ 120 เซลเซียส 15 นาที แม้กระทั่งการทิ้ง

ไว้ที่อุณหภูมิห้องในระยะเวลาที่มากกว่า 1 วัน ก็สามารถแข็งตัวได้เช่นกัน ในที่นี้ไม่ได้พิจารณาผลของระยะเวลาแข็งตัวกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ เมื่อ PDMS แข็งตัวแล้ว ดึงเอา ชิ้นฝาประกบด้านบนของไมโครเซนแนลออก

3.3.11 การตัดขอบการและเจาะรู ต่อท่อ

หลังจากหล่อแบบและแกะตัวไมโครฟลูอิดิกชิปจากแม่แบบในหัวข้อ 3.3.10 เพื่อความสะดวกในขั้นตอนต่อไป ตัวไมโครฟลูอิดิกชิป จะถูกตัดแต่งให้ได้ระนาบ จากนั้นจึงเจาะรูทางเข้าและออกของของเหลวในไมโครเซนแนล ซึ่งสามารถเจาะได้หลายวิธี แต่ไม่ควรใช้วิธีที่ทำให้เกิดขุยบริเวณผิวของรูที่เจาะ เนื่องจากความดันสูงในท่อทางเข้าอาจดันของเหลวให้ออกมาตามผิวที่ไม่เรียบเมื่อใส่ท่อของไหล เข้าไปภายหลัง นอกจากนี้ ขุย PDMS อาจทำให้ท่ออุดตันและตัวชิปเสียหายได้ ดังนั้นจึงใช้ เข็มฉีดยาตัดปลายให้ตั้งฉากและตะไบขอบให้แหลม เป็นหมุดสำหรับเจาะ โดยออกแรงกดเข็มลงไปใน PDMS ในทิศตั้งฉากกับระนาบไมโครเซนแนล ให้ทะลุ PDMS ซึ่งจะได้รูที่มีพื้นผิวเรียบไม่เกิดปัญหาการรั่วซึม

3.3.12 การประกบปิดท่อ

การประกบปิดร่องเปิดระดับไมครอน หรือไมโครเซนแนลให้เป็นร่องปิด โดยทำฟิล์มบางของ PDMS ในหัวข้อ 3.3.8 ลงบนแผ่นสไลด์เป็นขั้นแรก โดยนำแผ่นสไลด์ที่ถูกตัดให้มีขนาดพอดีด้วยที่ตัดกระดาษ หรือวัสดุที่มีความแข็งมากกว่ากระจกเช่น แผ่นอะลูมินา (alumina) แล้วกระแทะหรือบิออก หลังจากทำความสะอาดแผ่นสไลด์ด้วยน้ำยาล้างจานและน้ำแล้ว จึงนำไป ติดลงบนแท่นหมุนที่ไ้ระนาบ ของเครื่อง spin coater การติดแผ่นสไลด์ทำได้หลายวิธี เช่น ใช้เทปกาวสองหน้า หรือระบบสุญญากาศของเครื่อง spin coater ที่อาศัยผลต่างความดันกดแผ่นสไลด์ไม่ให้หลุดออกจากแท่นหมุน จากนั้นนำ PDMS มาหยดลงบนแผ่นสไลด์แล้วเกลี่ยให้ทั่ว จากนั้นเปิดเครื่อง spin coater ให้เครื่องหมุนเหวี่ยงมวลส่วนเกินของ PDMS ออก จนเหลือฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอ โดยเงื่อนไขที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 2500 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 2 นาที จากนั้นใช้เตาควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 70 เซลเซียส เมื่ออุณหภูมิเตาคงที่จึงวางแผ่นสไลด์ที่เคลือบฟิล์มบางลงบนเตาโดยหันด้านที่มีฟิล์มบางขึ้น แล้วจับเวลาประมาณ 5 นาที ใช้เข็มคืบสแตนเลสขนาดเล็กและบริเวณขอบ ฟิล์ม PDMS ดูว่าฟิล์มเหนียวติดคืบขึ้นมาหรือไม่ หากไม่ติดขึ้นมาต้องแน่ใจว่า PDMS ไม่ได้แข็งตัวไปแล้ว จากนั้นใช้เข็มคืบเอาแผ่นสไลด์ออกจากเตาแล้วนำ ตัวชิปมาประกบติดกับแผ่นฟิล์มดังกล่าว โดยพยายามไม่ให้มีฟองอากาศอยู่ระหว่าง ชิ้น PDMS ที่นำมาประกบกัน หรืออาจใช้ถุงสุญญากาศในการกดอัดและดูดเอาอากาศระหว่าง ชิ้น PDMS ซึ่งประกบกันออก

3.3.13 การต่อท่อ

ท่อสำหรับต่อสายยางขนาดเล็กเพื่อลำเลียงของไหลเข้ามาในไมโครเซนแนล งานวิจัยนี้ทำจากเข็มฉีดยาเบอร์ 27 ความยาว 2.5 นิ้ว ซึ่งตัดและตกแต่งรูปร่างโดยตะไบให้ได้ขนาดพอดี จากนั้นนำท่อที่ได้มาเสียบต่อที่รูซึ่งเจาะไว้แล้ว ใน หัวข้อ 3.3.11 หากต้องการเพิ่ม ความแข็งแรงและแน่นหนาบริเวณรอยต่อสามารถนำ PDMS ที่เหลืมาหล่อฐานโดยใช้เบ้าหล่อซึ่งทำจากบล็อกเข็มฉีดยาดังรูปที่ 3.12 จากนั้นนำไมโครฟลูอิดิกชิปที่เสร็จแล้ว มาวางให้แข็งตัวบนเตาควบคุมอุณหภูมิที่ 70 เซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง

3.3.14 การทดสอบก่อนใช้งาน

การทดสอบการไหล ก่อนการใช้งานของไมโครไมโครฟลูอิดิกชิป จะใช้กระบอกฉีดยาบรรจุน้ำ DI (deionized water) ขนาด 1 มิลลิลิตรต่อสายยาง เข้ากับท่อทางเข้าของไมโครฟลูอิดิกชิป แล้วทดสอบดันกระบอกฉีดยาเพื่อตรวจสอบ ว่าเกิดอุดตันในท่อหรือไม่ หากเกิดการอุดตันในท่อจึงทำการตรวจสอบหาสาเหตุและแก้ไข หากไม่มีการอุดตันจึงใช้ กระบอกฉีดยาอัดอากาศ ไล่น้ำออกจากท่อ แล้วจึงเก็บไมโครฟลูอิดิกชิปไว้ในกล่องกันฝุ่น หากไมโครฟลูอิดิกชิปเกิดเปราะเปื้อนด้วยฝุ่นหรือคราบ PDMS สามารถใช้เทปใสติดแล้วลอกออกเพื่อทำความสะอาดคราบก่อนการเก็บไว้เพื่อใช้งานได้

3.4 การออกแบบการทดลอง

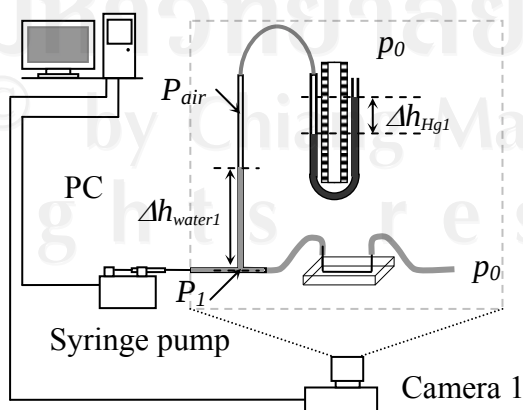
การออกแบบการทดลองเพื่อหา ผลของความดันต่ออัตราการไหลในไมโครฟลูอิดิกชิปที่สร้างด้วยเทคนิคแผ่นกัคลายวงจร จะสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยดังนี้

1. เพื่อพัฒนาวิธีวัดอัตราการไหลของของไหลในไมโครเซนแนล
2. เพื่อพัฒนาวิธีวัดความดัน
3. เพื่อเป็นการพัฒนาวิธีการสร้างไมโครฟลูอิดิกชิป ด้วยเทคนิค (EWBT)
4. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับผลต่างความดันทั้งสองปลายของไมโครเซนแนล
5. เพื่อพัฒนาระบบนับจำนวน microbead counter ในเบื้องต้น

สำหรับวัตถุประสงค์ข้อ 1-3 นั้นเป็นผลการพัฒนาสืบเนื่องจากการออกแบบและพัฒนาทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับผลต่างความดันทั้งสองด้านของไมโครเซนแนลคือทางเข้าและออก ดังที่กล่าวไว้แล้ว ในหัวข้อ 3.1-3.3 ดังนั้นจะกล่าวถึงเฉพาะ การออกแบบการทดลองเพื่อการบรรลุวัตถุประสงค์ ข้อที่ 4 และ 5

สำหรับข้อหวัข้อนี้อาจไม่ถูกต้องในแง่ของเหตุและผลมากนักเนื่องจาก การที่ของไหลหนึ่งไหลได้นั้นจะต้องมีที่มาจากผลของความดันซึ่งเป็นตัวขับเคลื่อนให้ของไหลไหลไปยังที่มีความดันต่ำกว่า แต่ทว่า เนื่องจากการเลือกใช้แหล่งจ่ายกระแสในที่นี้คือ syringe pump (Singkarat *et al.*, 2009) ที่มีอัตราการไหลคงที่เป็นตัวกำเนิดความดันระหว่างปลายทั้งสองของท่อนั้นสามารถควบคุมและสร้างได้ง่ายกว่าแหล่งจ่ายความดันคงที่มาก และเพื่อเป็นการศึกษาคุณลักษณะของ syringe pump และระบบไมโครฟลูอิดิกส์ที่ใช้ syringe pump ไปด้วย จึงลำดับความสัมพันธ์ใหม่ แทนที่จะเป็นผลของความดันต่ออัตราการไหล จึงเป็นอัตราการไหลของแหล่งจ่ายกระแสต่อความดัน หรืออาจกล่าวได้ว่า อัตราการไหลนี้เป็นอัตราการไหลของ syringe pump ซึ่งแท้จริงแล้วความดันเกิดจากแรงเค้นภายในของไหลที่ซึ่งเกิดจากความต้านทานการไหลในท่อ ส่วนผลต่างของความดันระหว่างท่อก็สามารถศึกษาโดยวัดเปรียบเทียบไปได้พร้อมกันโดยไม่ขัดกับเหตุผลทางฟิสิกส์ โดยการออกแบบการทดลองดังกล่าวจะอยู่บนพื้นฐานของ EC theory หรือ Poiseuille law ดังสมการ (2.174) โดยใช้เงื่อนไขการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ผลดังนี้

สำหรับจุดประสงค์ในการทดลองนี้มีเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองกับตัวทฤษฎีที่ว่า เมื่อ R_h มีค่าคงที่ อัตราการไหล Q และการเปลี่ยนแปลงความดัน Δp ระหว่างไมโครเซนแนลจะแปรผันตามกัน หรือแปลความได้ว่าการไหลในไมโครเซนแนลหนึ่งๆ เมื่อควบคุมให้อัตราการไหลของระบบเพิ่มขึ้นความดันในระบบก็จะเพิ่มขึ้นไปในทางเดียวกัน โดยจัดการทดลอง ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การจัดการทดลองเพื่อตรวจสอบผลการทดลองกับ Poiseuille law

สำหรับขั้นตอนการทดลองโดยสังเขปมีดังนี้

1. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ตรวจสอบระบบขับเคลื่อน syringe pump และระบบถ่ายภาพให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน
2. ใช้กระบอกฉีดยาขนาดเล็กฉีดยาน้ำ DI เข้าสู่ระบบจนกระทั่งของไหลไหลออกบริเวณทางออกด้านขวามือของรูปที่ 3.13 โดยไม่ให้มีฟองอากาศเข้าไปติดในระบบ หากมีฟองอากาศเข้าไปติดใช้กระบอกฉีดยาอัดอากาศไล่ออก โดยพยายามให้ไม่มีหยดของไหลขนาดเล็กติดบริเวณผนังท่อ แล้วฉีดยาน้ำ DI เข้าสู่ระบบอีกครั้ง จนกระทั่งมีน้ำในระบบโดยปราศจากฟองอากาศ
3. ต่อท่อและमानอมิเตอร์ดังรูปที่ 3.13 แล้วนำกระบอกฉีดยาบรรจุน้ำ DI ที่ไม่มีฟองอากาศภายในเข้ากับสายยางขาเข้า แล้วนำไปติดกับ plunger ของ syringe pump จากนั้น รอให้ระบบปรับสมดุลความดันโดยสังเกตจากระดับปรอทในमानอมิเตอร์ที่เท่ากันทั้งสองด้าน เมื่อระบบสมดุล สำหรับขั้นตอนนี้อาจใช้เวลา 15 นาที ถึง 2 ชั่วโมง
4. เปิดปั๊มที่อัตราการเคลื่อนที่ของ plunger ที่ ความเร็วค่าหนึ่งพร้อมกับการเริ่มต้นถ่ายภาพ รอจนกระทั่งสังเกตไม่เห็นความเปลี่ยนแปลงของระดับปรอทในमानอมิเตอร์จากนั้นรออีกประมาณ 5 นาที
5. หยุดปั๊มแล้วรอนระบบเข้าสู่สมดุล สำหรับขั้นตอนนี้อาจใช้เวลา 15 นาที ถึง 2 ชั่วโมง
6. เริ่มกระบวนการในข้อที่ 4 อีกครั้งโดย เปลี่ยนความเร็ว plunger เป็นค่าอื่นๆ แล้วทำซ้ำขั้นตอนที่ 4-5 จนครบทุกเงื่อนไขการทดลอง
7. เมื่อจบการทดลองให้นำภาพที่ถ่ายได้มาวัดความยาวบนสเกลด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ ImageJ แล้วบันทึกค่าระยะทาง Δh ไว้ สำหรับการคำนวณความดัน ส่วนวิธีการใช้งานโปรแกรมสามารถดูได้ที่ <http://rsb.info.nih.gov/ij/>
8. จากนั้นคำนวณความดันที่เวลาใดๆ จาก

$$P_1 = p_0 + \rho_{\text{water1}} g \Delta h_{\text{water1}} + \rho_{\text{Hg1}} g \Delta h_{\text{Hg1}} \quad (3.2)$$

เมื่อ P_1 คือความดันบริเวณจุดต่อท่อขาออกของปั๊ม กับमानอมิเตอร์ และตัวไมโคร

แมนเนลในไมโครฟลูอิดิกชิป

p_0 คือความดันบรรยากาศซึ่งสมมติว่าคงที่ตลอดการทดลอง

$\rho_{\text{water1}}, \rho_{\text{Hg1}}$ คือความหนาแน่นของน้ำและปรอทมีค่า 998 kgm^{-3} และ 13546.2 kgm^{-3}

ตามลำดับ

Δh คือผลต่างความสูงแสดงดังรูปที่ 3.13

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

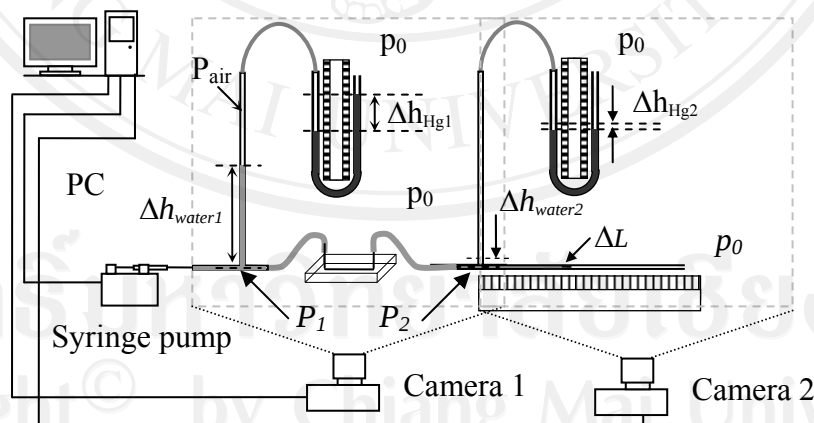
9. อัตราการไหลรวมของของไหลในระบบสามารถคำนวณจากอัตราการขับเคลื่อนของ syringe pump ซึ่งแปรผกผันกับช่วงเวลา τ โดย τ กำหนดขึ้นเพื่อให้ควบคุม linear stepper motor ให้เคลื่อนไป 1 สเต็ปภายในระยะเวลา τ และ 1 step นี้ plunger จะเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง 0.3 ไมโครเมตร ตามข้อมูลจำเพาะของผู้ผลิต linear stepper motor (Haydron™, 2006) โดยฐานเวลานี้จะอ้างอิงจากฐานเวลาภายในตัว ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งสร้างขึ้นเองโดย Rhodes (2010) ซึ่งปกติแล้วจะผิดพลาดมากที่สุดประมาณ $\pm 1/1000$ วินาที ในเวลาทำงาน 1 วินาที (ทั้งนี้ขึ้นกับการเขียนโปรแกรมภายใน) นั่นหมายถึงหากทำการทดลองไป 1000 วินาที หรือประมาณ 15 นาทีเมื่อใช้ฐานเวลาของคอนโทรลเลอร์ เวลาจริงที่ใช้ไปจะเป็น 1001 วินาที ซึ่งถือได้ว่ามีความเที่ยงตรงในระดับดีสำหรับการคำนวณอัตราการไหลค่าต่างๆ ซึ่งทำให้การคำนวณอัตราการไหลจากช่วงเวลา τ ซึ่งเป็นเวลาของตัว controller ที่ใช้ควบคุม stepper motor ผิดพลาดน้อย ดังนั้นเมื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของกระบอกฉีดยาได้เที่ยงตรงแล้ว นำไปคำนวณ พื้นที่หน้าตัดของกระบอกฉีดยา อัตราการไหลของปั๊มจะคำนวณได้ดังนี้

$$Q_{pump} = \frac{A_{syringe} \times 3(\mu m / step)}{\tau(ms / step)} \quad (3.3)$$

10. เขียนกราฟความดันกับเวลา แล้ววิเคราะห์ผลเทียบกับอัตราการไหล
สำหรับการทดลองเพื่อเปรียบเทียบโดยใช้เครื่องวัดความดันก็จะทำในลักษณะเดียวกัน เพียงแต่เปลี่ยนตัววัดความดันจากมานอมิเตอร์เป็นเครื่องวัดความดันดังรูปที่ 3.14 ซึ่งอ่านความดันได้โดยตรงและสามารถเก็บค่าไว้ในคอมพิวเตอร์ได้ทันที โดยจะเริ่มเก็บค่าความดันในขั้นตอนเดียวกันกับขั้นตอนเริ่มถ่ายภาพจากมานอมิเตอร์
11. วิเคราะห์ผลการทดลอง
12. สรุปผลการทดลอง



สำหรับจุดประสงค์ในการทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลต่างความดันระหว่างปลายทั้งสองของไมโครเซนแนลที่มีรูปแบบต่างๆ เพื่อทดสอบความสอดคล้องของการนำ EC theory มาอธิบายผลการทดลอง และตรวจสอบผลของความขรุขระของไมโครเซนแนลต่อความดันที่ลดลง โดยเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี และการจำลองทางคอมพิวเตอร์ใน 2 มิติ โดยจัดการทดลองให้มีรูปแบบดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การจัดการทดลองเพื่อศึกษาผลต่างความดันระหว่างปลายทั้งสองของไมโคร
แชนแนลที่มีรูปแบบต่างๆด้วยมานอมิเตอร์

สำหรับขั้นตอนการทดลองโดยสังเขปมีดังนี้

1. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ตรวจสอบระบบขับเคลื่อน syringe pump และระบบถ่ายภาพให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน จากนั้นตั้งค่าระยะเวลาถ่ายภาพ ค่าเวลา τ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราเร็วของ syringe pump
2. ใช้กระบอกฉีดยาขนาดเล็กฉีดยาน้ำ DI เข้าสู่ระบบจนกระทั่งของไหลไหลออกบริเวณทางออกด้านขวามือของรูปที่ 3.15 โดยไม่ให้มีฟองอากาศเข้าไปติดในระบบหากมีฟองอากาศเข้าไปติดใช้กระบอกฉีดยาอัดอากาศไล่ออก โดยพยายามให้ไม่มีหยดของไหลขนาดเล็กติดบริเวณผนังท่อ แล้วฉีดยาน้ำ DI เข้าสู่ระบบอีกครั้ง จนกระทั่งมีน้ำในระบบโดยปราศจากฟองอากาศ
3. ต่อท่อและमानอมิเตอร์ดังรูปที่ 3.15 แล้วนำกระบอกฉีดยาบรรจุน้ำ DI ที่ไม่มีฟองอากาศภายในเข้ากับสายยางขาเข้า แล้วนำไปติดกับ plunger ของ syringe pump จากนั้น รอให้ระบบปรับสมดุลความดันโดยสังเกตจากระดับปรอทในमानอมิเตอร์ที่เท่ากันทั้งสองด้านทั้งสองตัว เมื่อระบบสมดุล สำหรับขั้นตอนนี้อาจใช้เวลา 15 นาที ถึง 2 ชั่วโมง
4. เปิดปั๊มที่อัตราการเคลื่อนที่ของ plunger ที่ความเร็วค่าหนึ่งพร้อมกับเริ่มถ่ายภาพ รอจนกระทั่งสังเกตไม่เห็นความเปลี่ยนแปลงของระดับปรอทในमानอมิเตอร์ทั้งสอง จากนั้นรออีกประมาณ 10 นาที
5. หยุดปั๊มและการถ่ายภาพ โดยสั่งงานจากโปรแกรม
6. เริ่มกระบวนการในข้อที่ 2 อีกครั้งโดย ทำการทดลอง 1 - 6 ซ้ำในไมโครเซนแนลเดิมจนครบ 3 ครั้ง จากนั้นถอดท่ออย่างที่ต่อกับทางเข้าและออกไมโครเซนแนลออกเพื่อเปลี่ยนไปทำการทดลองบนไมโครเซนแนลรูปแบบอื่นๆ และจัดเก็บไฟล์ภาพที่ได้จากกล้องถ่ายรูปจนครบทุกเงื่อนไขการทดลอง
7. เมื่อครบทุกเงื่อนไข การทดลองแล้วนำภาพที่ถ่ายได้มาวัดความยาวบนสเกลด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ ImageJ แล้วบันทึกค่าระยะทาง Δh ทั้งสองค่าไว้ สำหรับการคำนวณความดัน
8. จากนั้นคำนวณความดันที่เวลาใดๆ จาก

$$P_1 - P_2 = (\rho_{Hg} g \Delta h_{Hg1} + \rho_{Water1} g \Delta h_{Water1}) - (\rho_{Hg} g \Delta h_{Hg2} + \rho_{Water2} g \Delta h_{Water2}) \quad (3.4)$$

เมื่อ P_1 คือความดันบริเวณจุดต่อท่อขาออกของปั๊ม กับमानอมิเตอร์ และตัวไมโคร

เซนแนลในไมโครฟลูอิดิกชิป

P_2 คือความดันบริเวณจุดต่อท่อขาออกของไมโครฟลูอิดิกชิป กับमानอมิเตอร์ และไมโครเซนแนลในไมโครฟลูอิดิกชิป

$\rho_{\text{water}} > \rho_{\text{Hg}}$ คือความหนาแน่นของน้ำและปรอทมีค่า 998 kgm^{-3} และ 13546.2 kgm^{-3}
ตามลำดับ

Δh คือผลต่างความสูงแสดงดังรูปที่ 3.15

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

9. ส่วนอัตราการไหลรวมของของไหลในระบบสามารถคำนวณจากอัตราการขับเคลื่อนของ syringe pump ตามสมการ (3.3) และหาอัตราการไหลที่เวลาใดๆ ในไมโครเซนแนลซึ่งได้จากการวัดการเคลื่อนที่ของรอยต่อของน้ำและอากาศในรูปที่ 3.15 โดยคำนวณจาก

$$Q = A_{\text{tube}} \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (3.5)$$

เมื่อ Q คืออัตราการไหล โดยประมาณว่าอัตราการไหลที่เวลาใดๆ ซึ่งอยู่บนพื้นฐานที่ว่าช่วงระยะเวลาระหว่างภาพมีค่าน้อย

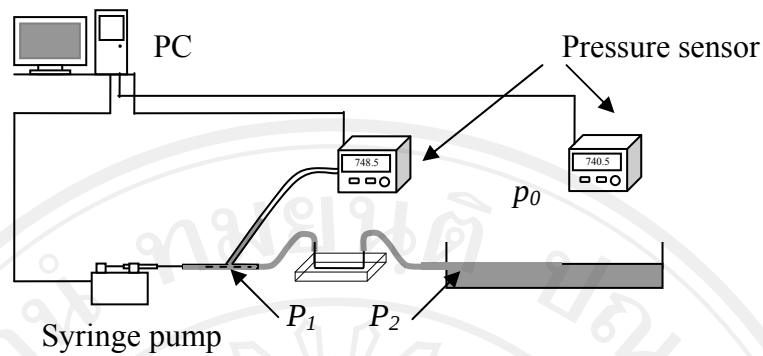
A_{tube} คือพื้นที่หน้าตัดของท่อยาวบริเวณทางออกซึ่งประกอบด้วยสเกลไม้บรรทัด

ΔL คือผลต่างระยะรอยต่อระหว่างน้ำและอากาศที่เคลื่อนที่ไปในภาพติดกัน

Δt คือช่วงระยะเวลาระหว่างการกดชัตเตอร์ในแต่ละภาพ

สำหรับสมการ (3.5) จะ เขียนกราฟความดันและอัตราการไหลเทียบกับเวลา แล้ววิเคราะห์ผลเทียบกับอัตราการไหลรวมของระบบ

สำหรับการทดลองวัดความดันด้วยเครื่องวัดความดันจะจัดการทดลองคล้ายรูปที่ 3.15 เพียงเปลี่ยนมานอมิเตอร์เป็นเครื่องวัดค่าความดันดังรูปที่ 3.14 แสดงไว้ในรูปที่ 3.16 โดยผลต่างความดันจะวัดได้จากค่าผลต่างจากเครื่องวัดทั้งสองตัว เครื่องวัดความดันตัวแรกจะวัดความดันขาเข้าของไมโครเซนแนล ส่วนตัวที่สองจะวัดค่าความดันบรรยากาศ p_0 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ P_2 โดยจัดการทดลองให้กึ่งกลางท่อบริเวณที่น้ำ DI ไหลออกมีระดับเทียบเท่ากับระดับผิวน้ำในถาดพื้นที่หน้าตัดกว้าง ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความสูงเนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในถาดน้อยมาก หรือกล่าวได้ว่าความดันบริเวณผิวของเหลวมีค่าใกล้เคียงกับความดันบริเวณปลายท่อขาออกได้ สาเหตุที่จัดการทดลองเช่นนี้ เนื่องจากต้องการตรวจสอบว่าค่าความดันบรรยากาศสามารถประมาณได้ว่าการทดลองและสาเหตุที่ไม่ทำการวัดอัตราการไหลเนื่องจาก ต้องการลดผลของแรงตึงผิวและการไหลท่วมท่อซึ่งรบกวนการไหลออก และจะเปรียบเทียบเฉพาะค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงในการวัดค่าความดันทั้งสองกรณี เนื่องจากอัตราการไหลรวมในระบบต้องคงที่ซึ่งยืนยันจากกฎการอนุรักษ์มวล



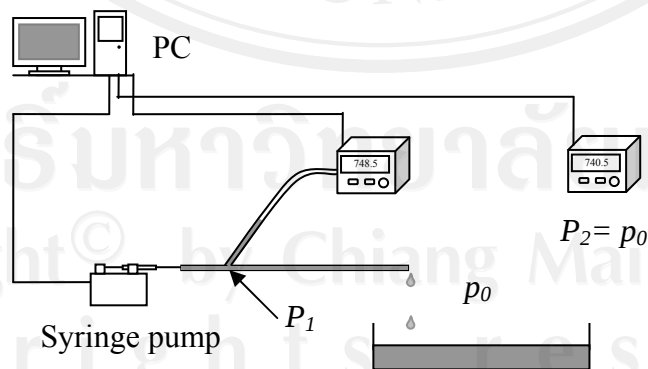
รูปที่ 3.16 การจัดการทดลองเพื่อศึกษาผลต่างความดันระหว่างปลายทั้งสองของไมโคร
แชนแนลที่มีรูปแบบต่างๆ โดยใช้เครื่องวัดความดัน

10. วิเคราะห์ผลการทดลอง

11. สรุปผลการทดลอง

3.4.2 การทดลองเพื่อหาผลของการเปลี่ยนแปลงความดันเนื่องจากความตึงผิว ที่อัตราการไหล ต่างกัน

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบผลของแรงตึงผิวซึ่งมีผลให้ความดันระบบ
เปลี่ยนแปลงไป ในกรณีที่ปลายท่อขาออกของไมโครแชนแนล ไม่ได้จุ่มปลายลงในอ่างน้ำ ดังรูปที่
3.15 เพื่อพยายามอธิบายผลของแรงตึงผิวที่มีต่อระบบไมโครฟลูอิดิกส์ที่ขับเคลื่อนด้วย syringe pump
ให้สมบูรณ์มากขึ้น โดยตัดเอาผลการสูญเสียความดันจากไมโครแชนแนลออก และจัดการทดลอง
ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การจัดการทดลองเพื่อศึกษาผลของความตึงผิวโดยใช้เครื่องวัดความดัน

สำหรับวิธีการทดลองโดยสังเขปมีดังนี้

1. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ตรวจสอบระบบขับเคลื่อน syringe pump และระบบถ่ายภาพให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน จากนั้นตั้งค่าระยะเวลาถ่ายภาพ ค่าเวลา τ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราเร็วของ syringe pump
2. ใช้กระบอกฉีดยาขนาดเล็กฉีดน้ำ DI เข้าสู่ระบบจนกระทั่งของไหลไหลออกบริเวณทางออกด้านขวามือของรูปที่ 3.17 โดยไม่ให้มีฟองอากาศเข้าไปติดในระบบ หากมีฟองอากาศเข้าไปติดใช้กระบอกฉีดยาอัดอากาศไล่ออก โดยพยายามให้ไม่มีหยดของไหลขนาดเล็กติดบริเวณผนังท่อ แล้วฉีดน้ำ DI เข้าสู่ระบบอีกครั้ง จนกระทั่งมีน้ำในระบบโดยปราศจากฟองอากาศ
3. ต่อท่อและमानอมิเตอร์ดังรูปที่ 3.17 แล้วนำกระบอกฉีดยาบรรจุน้ำ DI ที่ไม่มีฟองอากาศภายในเข้ากับสายยางขาเข้า แล้วนำไปติดกับ plunger ของ syringe pump จากนั้น รอให้ระบบปรับสมดุลความดันโดยสังเกตจากระดับปรอทในमानอมิเตอร์ที่เท่ากันทั้งสองด้านทั้งสองตัว เมื่อระบบสมดุล สำหรับขั้นตอนนี้อาจใช้เวลาถึง 15 นาที
4. เปิดปั๊มที่อัตราการเคลื่อนที่ของ plunger ที่ความเร็วค่าหนึ่งพร้อมกับเริ่มเก็บค่าความดันเข้าสู่คอมพิวเตอร์ ประมาณ 10 นาที
5. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความเร็วของ syringe pump
6. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบกันเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป
7. วิเคราะห์ผลการทดลอง
8. สรุปผล

3.4.3 การทดลองเพื่อพัฒนาระบบนับจำนวน microbead counter ในเบื้องต้น

การใช้เทคนิคการวัดความเร็วและจำนวนอนุภาคในของไหลมีความสำคัญกับการประยุกต์ใช้งานระบบไมโครฟลูอิดิกส์สำหรับการตรวจวัดเช่นนับเซลล์ (flow cytometry) ซึ่งมีรายงานการศึกษาเป็นจำนวนมาก แต่สำหรับการศึกษาวิจัยระบบนับจำนวนที่สร้างขึ้นนี้มีเหตุผล 2 ประการคือ

1. การศึกษาความเร็วของอนุภาคสำหรับวิธีศึกษาความเร็วของอนุภาค droplet ที่แขวนลอยไปกับการไหลในแง่ของ EC theory ในเบื้องต้นโดยสังเขป เพื่อที่จะพัฒนาต่อยอดให้สามารถนำไปนับจำนวนอนุภาคขนาดเล็กๆ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-100 ไมโครเมตรได้
2. การพัฒนาระบบตรวจวัดที่สามารถแยกแยะความแตกต่างของอนุภาคที่แขวนลอยในไมโครแชนแนลในเบื้องต้น เพื่อพัฒนาต่อยอดไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นต่อไป

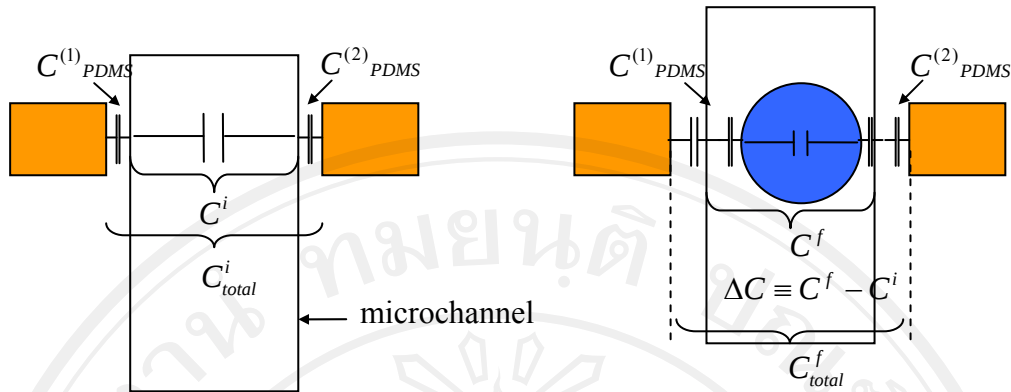
ในที่นี้จะกล่าวถึงการทดลองเพื่อวัตถุประสงค์แรกซึ่งเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้เพียงเท่านั้น โดยจะ

กล่าวถึงหลักการและการออกแบบเครื่องวัดที่สร้างขึ้น เพื่อตรวจจับอนุภาคที่ไหลผ่านจุดตรวจวัดแบบพอสั่งเบป

เครื่องตรวจจับ droplet ในไมโครเซนแนลแบบไม่สัมผัส (contactless capacitive droplet detection)

เทคนิคการตรวจจับนี้มีการใช้อย่างแพร่หลายทั้งในแง่ของการตรวจจับ (detection) และการจำแนก (characterization) สารหรืออนุภาคในไมโครเซนแนลโดยอาศัยการวัดค่าความจุ (capacitance) ของสาร ระหว่างขั้วไฟฟ้า (electrode) กระแสลับ ดังงานวิจัยตีพิมพ์ของ Niu *et. al.* (2007) หรือในบางงานวิจัยที่ขยายแนวคิดไปเป็นการวัดค่าความต้านทานเชิงความถี่หรืออิมพีแดนซ์ (impedance) (Cheung *et. al.*, 2005)(Gomez-Sjoberg *et. al.*, 2005) สำหรับแนวคิดการวัดแบบไม่สัมผัสนี้มีประโยชน์หลายประการ ซึ่งหนึ่งในนั้น คือการวัดโดยไม่ทำลาย (non-destructive) และสามารถ ป้องกันการทำปฏิกิริยาของสารกับอิเล็กโทรดได้ (Guijt *et. al.*, 2001) ไม่ขึ้นกับความเข้มแสงภายนอกไม่จำเป็นต้องทดลองในที่มืด (Capacitive Imaging.com, 2006) ยกเว้นว่ามีการรบกวนจากคลื่นวิทยุจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นที่มีความถี่เดียวกัน

แนวคิดหลักการวัดค่าความจุของอนุภาคนี้นี้ ลดทอนความซับซ้อนลงมาจากการวัดค่าอิมพีแดนซ์ เนื่องจากผนังของไมโครเซนแนลซึ่งเป็น PDMS ที่เคลือบหรือฝังด้วยอิเล็กโทรด ใน PDMS ที่เป็นสารไดอิเล็กทริก (dielectric) มีความต้านทานไฟฟ้าสูงมากโดยมีสภาพต้านทานที่มีค่าถึง $2.0 \times 10^{13} \Omega/\text{cm}$ สำหรับค่า dielectric และ dielectric loss สามารถดูได้จากภาคผนวก ก และเนื่องจากเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าตรงยาวดังรูปที่ 3.21 ค่าความเหนี่ยวนำในขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจึงมีค่าน้อยมากในหลัก 10 nH และทำให้ความต้านทานระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเข้าใกล้ค่าอนันต์ จนสามารถประมาณได้ว่า ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองที่มีไมโครเซนแนลบรรจุของเหลวหรืออนุภาคอยู่ระหว่างกลางนั้นเป็นตัวเก็บประจุ C_x ซึ่งค่าของ C_x จะอยู่ระหว่าง C_{total}^i และ C_{total}^f ได้ โดยให้เป็นดังรูปที่ 3.18



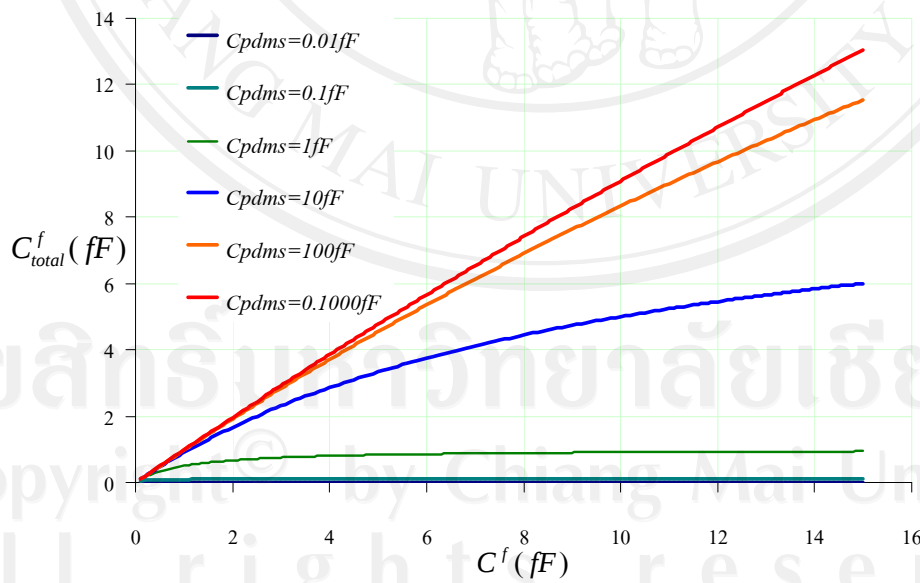
รูปที่ 3.18 การประมาณปัญหาสำหรับการออกแบบระบบตรวจจับอนุภาค

เมื่อรวมค่า C^1_{PDMS} กับ C^2_{PDMS} เข้าด้วยกันเป็น C_{PDMS} โดย $C_{PDMS} = \frac{C^{(1)}_{PDMS} C^{(2)}_{PDMS}}{C^{(1)}_{PDMS} + C^{(2)}_{PDMS}}$

เป็นค่าคงที่ของระบบซึ่งขึ้นกับการจัดระยะตำแหน่งของอิเล็กโทรด คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของ PDMS และพื้นที่ขั้วของขั้วไฟฟ้า จากรูปเมื่อพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของ C^f_x กับ C_{PDMS} จะได้ว่า

$$C^f_{total} = \frac{C_f C_{PDMS}}{C_f + C_{PDMS}} \quad (3.6)$$

เมื่อพิจารณาค่า C^f_{total} โดยเงินกราฟระหว่าง C^f_{total} กับ C^f ที่ค่า C_{PDMS} ต่างกันดังรูปที่ 3.19



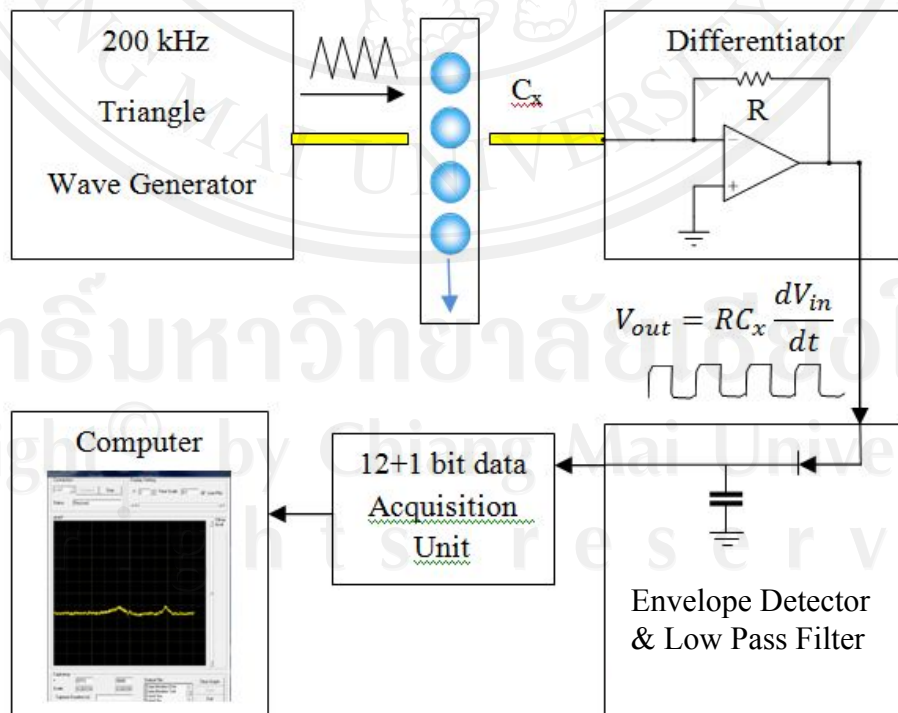
รูปที่ 3.19 กราฟระหว่างค่าความจุที่วัดได้ระหว่างอิเล็กโทรด C^f_{total} กับค่า C^f ที่ค่า C_{PDMS} ต่างกัน

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ C^f จะสามารถตรวจวัดและประมาณได้อย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อ C_{PDMS} มีค่ามาก โดยประมาณจากการคำนวณของ Ernst, et al. (2009) จะได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของ C^f จะมีค่าประมาณอยู่ในระดับ 0.01 fF– 100 fF

ส่วนการวัดสัญญาณการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของสารที่อยู่ในไมโครเซนแนลสามารถทำได้โดยหลากหลายวิธีการ สำหรับวิธีการที่เลือกใช้ ในงานวิจัยนี้จะใช้สมบัติความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ ออปแอมป์ (op-amp:operational amplifier) ทำหน้าที่หาอนุพันธ์ของสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ความถี่ 200 kHz ดังรูปที่ 3.20 ซึ่งมากพอที่จะไม่ทำให้ประจุไฟฟ้าเหนี่ยวนำบริเวณผนังไมโครเซนแนลและในของไหลเกิดเป็น Derby layer (Bruss,2008) และรบกวนการเคลื่อนที่ของ droplet และที่ความถี่นี้เป็นความถี่ที่อัตราการขยายสัญญาณมากที่สุดโดยสัญญาณไม่เพี้ยน (distort)

ซึ่งการวิเคราะห์วงจรโดยละเอียดจะใช้ Laplace transform แล้วแทนค่าคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์ที่เลือกใช้ ลงไป พบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณออกของวงจร differentiator ยังคงประมาณให้ เป็นเชิงเส้นได้เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ให้ตัวออปแอมป์ที่ใช้ เป็นอุปกรณ์อุดมคติได้ โดย

$$V_{out} = RC_x \frac{dV_{in}}{dt} \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.20 แผนผังกระบวนการวัดค่า C_x ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากมีอนุภาคในไมโครเซนแนล

จากสมการ (3.7) จะได้ว่าแอมพลิจูด V_{out} แปรผันตรงกับค่า C_x จากนั้นสัญญาณดังกล่าวจะถูกขยายและวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณโดยวงจร peak detector ที่มีระยะเวลาคืนค่าของสัญญาณสั้น หรือที่เรียกกันว่า envelope detector ซึ่งฟังก์ชันวงจรความถี่ต่ำเอาความถี่สูงอันเป็นสัญญาณรบกวนออก จากนั้นสัญญาณดังกล่าวจะถูกแปลงค่าให้เป็นค่าดิจิทัลแล้วส่งค่าไปประมวลผลสัญญาณในคอมพิวเตอร์ โดยมีผังวงจรดังรูปที่ 3.22 ซึ่งคุณสมบัติของวงจรที่ออกแบบไว้มีดังนี้

Voltage to capacitance ratio : $0.24\text{V}/\text{fF} \times \text{Gain Amplifier}$

Gain amplifier : $\approx 0.1 - 10\text{X}$ (adjustable)

Analog to digital convertor resolution : 12+1 bit

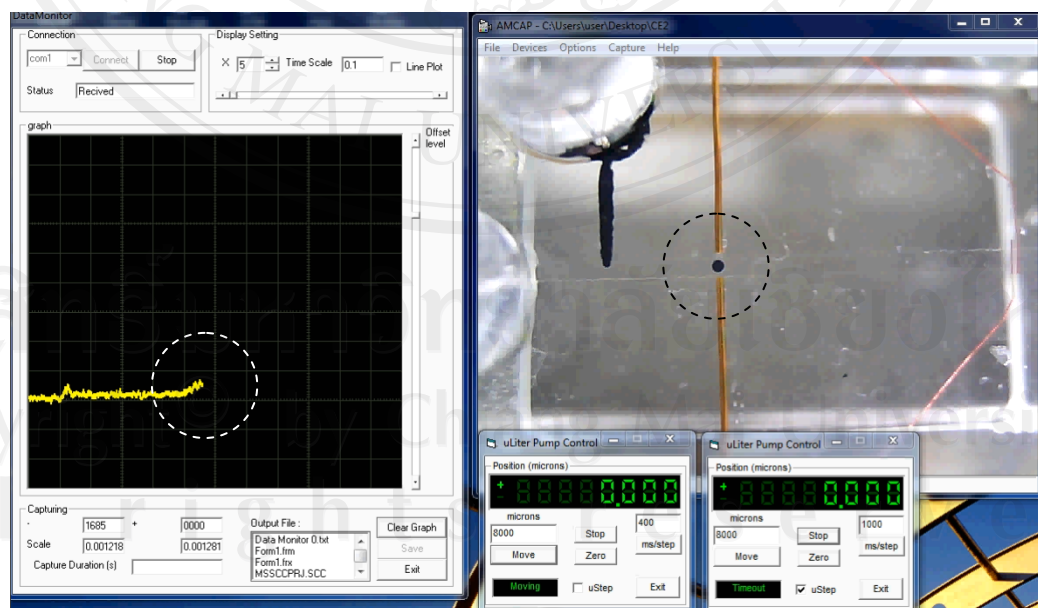
Offset capacitance ($C_{external}$) : Manual adjustable Offset

Maximum output signal swing : 24 V p-p

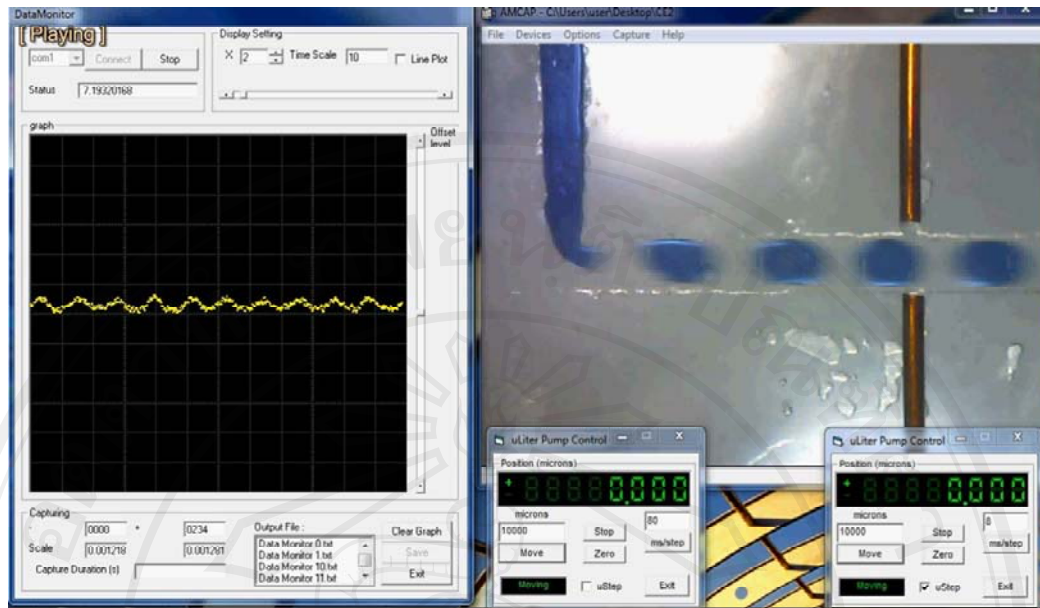
Interface: RS232 with baud rate 57600

Fastest speed of detection : 10 Hz

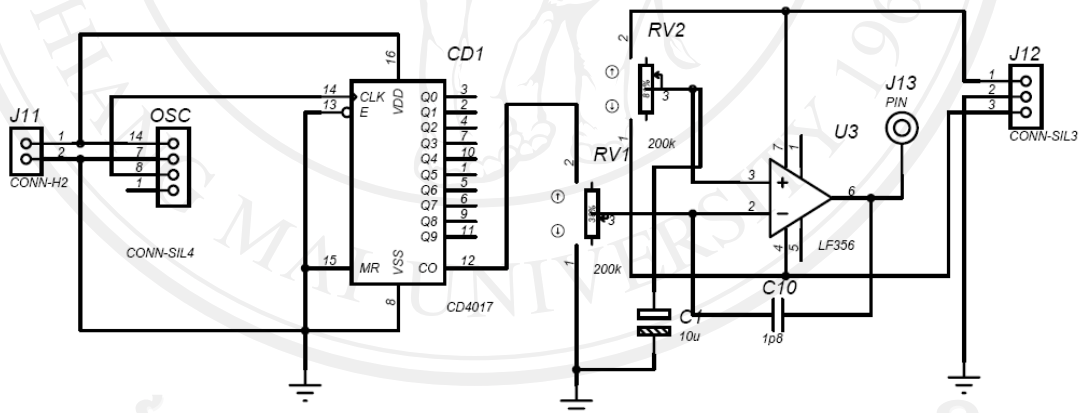
Smallest volume can be detected : $2.5 \pm 1 \text{ nl}$



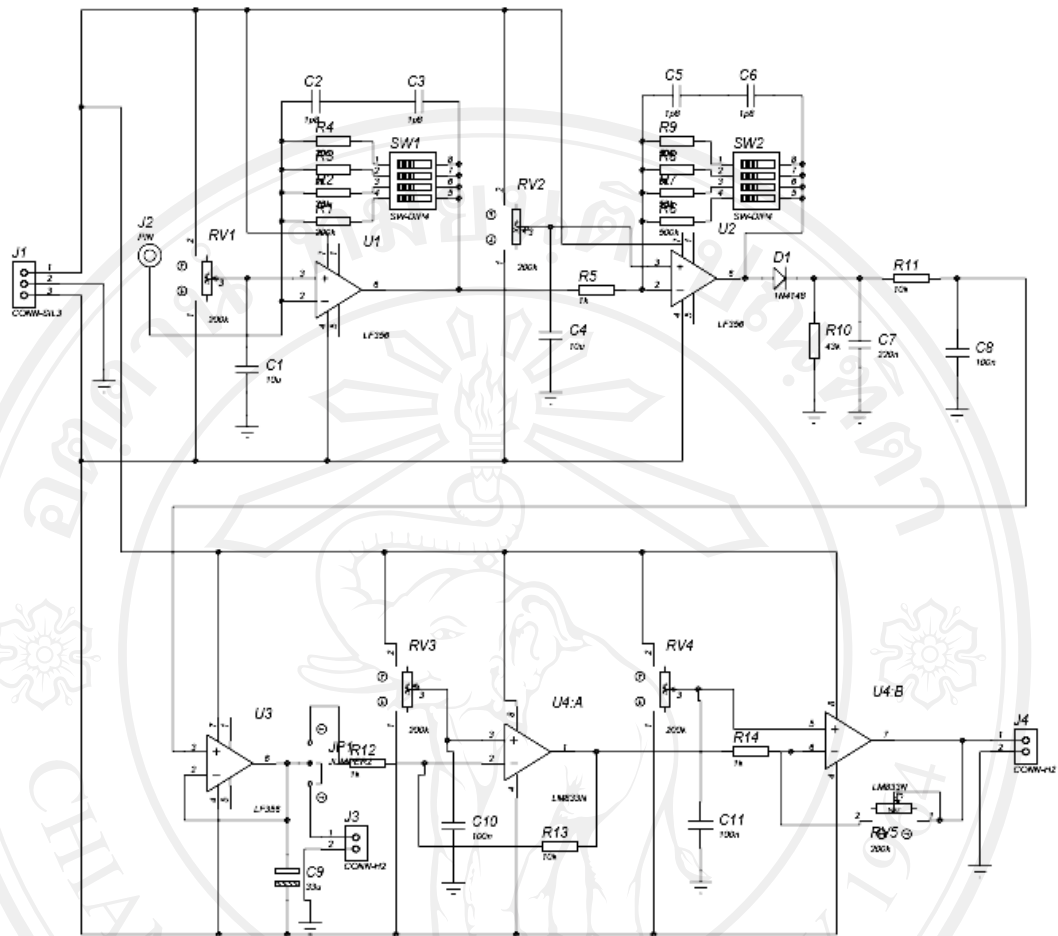
รูปที่ 3.21 (ก) ภาพขณะที่มี droplet อยู่ระหว่างหัวอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.21 (ข) ผลการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่วัดได้จาก droplet ที่วิ่งผ่านหัวอิเล็กโทรด กับภาพที่ได้จากการบันทึกวิดีโอในขั้นตอนการทดสอบ



รูปที่ 3.22 (ก) วงจร capacitive droplet detection ส่วน oscillator



รูปที่ 3.22 (ข) วงจร capacitive droplet detection

J1 และ J12 ขา1:+15V,ขา2: Ground,ขา3:-15V

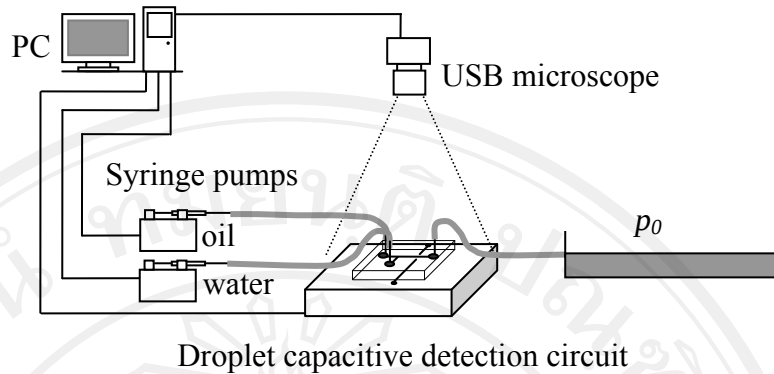
J4 ขา1:signal out, ขา2: Ground

J11 ขา1:+5V, ขา2:Ground

J13 triangle wave excitation terminal

J2 detection terminal

CONN-SIL4 oscillator module 2 MHz



รูปที่ 3.23 การจัดการทดลองเพื่อศึกษาความเร็วของอนุภาค droplet ที่แขวนลอยในของเหลวพาหะ กับอัตราการไหลจากการขับโดย syringe pump

สำหรับวิธีศึกษาความเร็วของอนุภาค droplet ที่แขวนลอยไปกับการไหล กับอัตราการไหลที่เกิดจากการขับดันโดย syringe pump ซึ่งเลือกใช้น้ำผสมสีผสมอาหาร และน้ำมัน เป็นของเหลวสำหรับการทดลอง โดยจะใช้ T-junction technique ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 หัวข้อ 2.5 ซึ่งขนาดของ droplet ขึ้นกับอัตราการไหลที่เป็นไปตามกฎการสเกล ดังสมการ (2.173) โดยวิธีการทดลองพอสังเขปมีดังนี้

1. จัดชุดการทดลองดังรูปที่ 3.23
2. ตรวจสอบการทำงานของ syringe pump กล้องถ่ายภาพ เครื่องวัดสัญญาณ เพื่อหาจุดบกพร่องและแก้ไข หากพบจุดบกพร่อง
3. เปิดปั๊มเพื่อปัมน้ำมันให้ไหลเต็มท่อแล้วหยุดปั๊ม รอจนแน่ใจว่าน้ำมันในระบบหยุดไหลแล้ว โดยในกรณีนี้น้ำมันจะทำหน้าที่เป็นของเหลวพาหะ
4. เปิดปัมน้ำมัน และน้ำ ที่อัตราไหลตามเงื่อนไขที่กำหนด พร้อมกับบันทึกสัญญาณค่าความจุเข้าสู่คอมพิวเตอร์
5. เมื่อ droplet เกิดขึ้นจนกระทั่ง มีอัตราคงที่ประมาณ 2 นาที จากนั้นให้หยุดปั๊ม สังเกตได้จากสัญญาณค่าความจุ จะมีคาบสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 3.21 (ข)
6. รอจนของไหลหยุดไหล จึงหยุดบันทึกข้อมูล
7. ทำการเปลี่ยนเงื่อนไขหรืออัตราการไหลของทั้ง น้ำและน้ำมัน แล้วทำซ้ำขั้นตอนที่ 4-6 จนครบทุกเงื่อนไข
8. วิเคราะห์ผลการทดลอง