

การออกแบบและสร้างเครื่องนับจำนวนอนุภาคซึ่งแขวนลอยในสารละลาย
ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

นางสาวสาทิพย์ ศรีมุงคุณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2550

**DESIGN AND FABRICATION OF DETECTOR FOR
PARTICLE SUSPENDED IN SOLUTIONS USING
MEMS TECHNOLOGY**

Satit Seemungkoon

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2007**

การออกแบบและสร้างเครื่องนับจำนวนอนุภาคซึ่งแขวนลอยในสารละลาย
ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกมล)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.นิมิต ชมนาวัง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ปราณี ชุมสำโรง)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สาทิษฐ์ ศรีมุงคุณ : การออกแบบและสร้างเครื่องนับจำนวนอนุภาคซึ่งแขวนลอย
ในสารละลายด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (DESIGN AND FABRICATION
OF DETECTOR FOR PARTICLE SUSPENDED IN SOLUTIONS USING MEMS
TECHNOLOGY) อาจารย์ที่ปรึกษา : อ. ดร.นิมิต ชมนาวัง, 120 หน้า

ในวิทยานิพนธ์นี้ ทำการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้เพื่อทำการนับจำนวนอนุภาค
ซึ่งแขวนลอยในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตัวตรวจรู้ได้พัฒนาขึ้นในกระบวนการเทคโนโลยี
แผ่นวงจรมีพิมพ์และระบบกลไฟฟ้าจุลภาค แม้พิมพ์โลหะของช่องทางเดินจุลภาคถูกสร้างขึ้น
ด้วยกระบวนการลิโธกราฟีและการชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าบนแผ่นฐานกราไฟต์และ
ฐานกระจก โครงสร้างช่องทางเดินจุลภาคทำการผลิตซ้ำด้วยซิลิโคน PDMS ด้วยวิธีการหล่อแบบ
กับกระจก และทำการพลาสติกของออกซิเจนเพื่อสร้างช่องทางเดินจุลภาค ซึ่งมีขนาดกว้าง 50 μm
สูง 70 μm และ ยาว 140 μm ขั้วอิเล็กโทรดทำด้วยฟิล์มโลหะ Ti/Cu/Ni/Au จำนวน 2 ขั้ว วางตัวกัน
ผ่านส่วนที่เล็กที่สุดภายในช่องทางเดินจุลภาคเพื่อตรวจจับความต้านทาน วัดค่าความต้านทาน
ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายในช่องทางเดินจุลภาคด้วยโอห์มมิเตอร์ และบันทึกค่าด้วย
โปรแกรม LabVIEW ด้วยหลักการแบ่งแรงดันไฟฟ้า อนุภาคโพลีเมทราโคลเลทที่มีขนาดเส้นผ่าน
ศูนย์กลาง 40 μm ซึ่งแขวนลอยในสารละลาย ได้นำมาใช้ในการนับ เนื่องจากค่าสภาพต้านทาน
ไฟฟ้าของอนุภาคสูงกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้ส่งผลให้ค่าความต้านทานของช่องทางเดิน
จุลภาคเพิ่มขึ้นเมื่อมีอนุภาคอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในช่องทาง
เดินจุลภาค เนื่องจากอนุภาคสามารถคำนวณได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าความ
ต้านทานของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่
แม่นยำ เมื่อเปรียบเทียบกับการประมาณด้วยแมกซ์เวลล์ที่ใช้กันทั่วไป ในการทดลองนับจำนวน
อนุภาคปริมาตรตั้งต้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีอนุภาค ถูกฉีดเข้าไปในตัวตรวจรู้ด้วย
กระบอกฉีดยาอัตโนมัติ สัญญาณที่ได้จากการตรวจนับมีสัญญาณรบกวนมาก เพื่อลดสัญญาณ
รบกวนดังกล่าว ได้เพิ่มตัวตรวจรู้อีก 1 ชุดและใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีอนุภาคเป็น
สารละลายในการนำไฟฟ้า นำสัญญาณรบกวนจากตัวตรวจรู้ทั้งสองมาลบกัน และกรองด้วย
ความถี่แถบผ่านช่วง 55 Hz – 10 kHz นอกจากนี้ สัญญาณที่ผ่านการกรองที่มีค่าแรงดันต่ำกว่า
แรงดันระดับเปลี่ยน +/- 0.030 โวลต์ จะถูกกำจัด สุดท้ายแรงดันสูงสุดเนื่องจากความต้านทานที่
เปลี่ยนไปเพราะอนุภาคจะถูกตรวจนับ สำหรับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีจำนวนอนุภาค
แขวนลอยอยู่ 22 อนุภาค/1.8 μl ได้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของอนุภาคที่ 18 อนุภาค/1.8 μl เมื่อ
สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีจำนวนอนุภาคแขวนลอยอยู่ 44 อนุภาค/1.8 μl ได้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย

ของอนุภาคที่ 38 อนุภาค/1.8 μl และเพิ่มจำนวนอนุภาคที่แขวนลอยเป็น 66 อนุภาค/1.8 μl ได้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเพิ่มเป็น 52 อนุภาค/1.8 μl ค่าเหล่านี้ได้มาจากการวิเคราะห์ข้อมูลใน 218 ช่วงของการนับอนุภาค แต่ละช่วงครอบคลุมทั้งหมด 2 วินาที อย่างไรก็ตาม ผลการนับที่ได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากการยึดเกาะของอนุภาคที่ผนังของกระบอกฉีดยาที่ท่อนำสารละลายและที่ช่องทางเดินจุลภาคของตัวตรวจรู้เอง

SATIT SEEMUNGKON : DESIGN AND FABRICATION OF DETECTOR
FOR PARTICLE SUSPENDED IN SOLUTIONS USING MEMS
TECHNOLOGY. THESIS ADVISOR : NIMIT CHOMNAWANG, Ph.D.,
120 PP.

MEMS/PARTICLE COUNTER/MICROFLUIDIC

In the thesis, detectors for counting particle that suspended in electrolyte solution are designed and fabricated. The detector development technologies include printed circuit board (PCB) and Micro-Electro-Mechanical Systems processes. Microchannel metallic molds are constructed by using UV lithography and Ni electroplating onto graphite and glass substrates. The microchannel structure is replicated into a Polydimethylsiloxane (PDMS) silicone bulk by casting method. It is treated by oxygen plasma and bonded onto a glass substrate to form a complete microchannel. The smallest part of the microchannel is 50 μm wide, 70 μm high and 140 μm long. Two Ti/Cu/Ni/Au electrodes are fabricated across this smallest part of the microchannel for resistance measurement. With a simple voltage-divider method, resistances of the electrolyte filled micro-channels are recorded by an ohmmeter as well as data acquisition card with a LabVIEW software. The polymethacrylate particles, with a diameter of 40 μm suspended in water, are used in the counting experiments. Since the particle resistivity is higher than that of electrolyte solution, presence of particles in between the two electrodes increases a resistance of the microchannel. Changes in microchannel resistance by the particles are predicted by a resistive equivalent circuit mathematical model. The developed model gives more

accurate resistance changes in comparison with the conventional Maxwell's approximation. In counting experiments, a pre-determined volume of electrolyte solution with a particle density is injected into a detector by a syringe pump. Unfortunately, signals recorded from a single detector are too noisy. To reduce noises, an additional detector is loaded with a blank electrolyte solution. Noisy signals from both detectors are subtracted and filtered by a 55Hz to 10kHz band-pass filter. Furthermore, the filtered signals with amplitudes less than a threshold voltage of ± 0.03 V are eliminated. Finally, voltage peaks due to resistance changes by the particles are counted. For electrolyte solution with particle density of 22, 44 and 66 per $1.8 \mu\text{l}$, the dual detectors predict average density value of 18, 38 and 52 per $1.8 \mu\text{l}$. These values are obtained by statistical analysis from 218 particle counting intervals, each of covers duration of 2 seconds. Considering particle adhered to the walls of the syringe, feeding tubes, and microchannel itself, the resulting less numbers of counted particles are reasonable ones

School of Electrical Engineering

Academic Year 2007

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่ อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยเสมอมา ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรายุทธ สุจิตจร รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและความรู้ทางด้านวิชาการมาโดยตลอด ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราณี ชุมคำโรง อาจารย์วิชัย ศรีสุรภัย ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่ง ขอขอบคุณคุณประพล จาระตะคุ คุณประพันธ์ กัทวี คุณชาติรี ชวนะนรเศรษฐ์ และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของข้าพเจ้า ขอขอบคุณ คุณอัญชุลี รักค่านกลาง และคุณภัทรวรรณ สิทธิกวินกุล เลขานุการและธุรการประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้กรุณาช่วยเหลือด้านเอกสารต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษา ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอพระขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติ ๆ ของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความหวังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจในยามที่ผู้วิจัยท้อและทุกข์ใจช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

สาทิพย์ ศรีมุงคุณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มของวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค.....	4
2.3 เทคนิคการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค.....	5
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
3 ทฤษฎีในการตรวจรูอนุภาค.....	19
3.1 ความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาค.....	19
3.1.1 การประมาณค่าความต้านทานช่องทางเดินจุลภาค ด้วยสภาพต้านทานไฟฟ้ายังผลของแมกซ์เวลล์.....	19
3.1.1.1 ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค ($n = 1$).....	20
3.1.1.2 ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 2 อนุภาค ($n = 2$).....	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.1.3	ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 3 อนุภาค ($n = 3$).....	25
3.1.2	การประมาณค่าความต้านทานช่องทางเดินจุลภาค ด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้า.....	26
3.1.2.1	ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค ($n = 1$).....	27
3.1.2.2	ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 2 อนุภาค ($n = 2$).....	30
3.1.2.3	ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 3 อนุภาค ($n = 3$).....	33
4	กระบวนการพัฒนาช่องทางเดินจุลภาค.....	38
4.1	เทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB).....	38
4.1.1	การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์.....	38
4.1.2	การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ โดยใช้ฟิล์มแห้ง.....	39
4.1.2.1	การสร้างช่องทางเดินจุลภาค.....	40
4.1.2.2	การสร้างช่องทางเข้า – ออกของของเหลว.....	41
4.1.2.3	การบอนด์ช่องทางเดินจุลภาคกับแผ่นปกคลุม.....	42
4.1.3	สรุป.....	44
4.2	เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS).....	45
4.2.1	การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกราฟไฟต์.....	45
4.2.1.1	การสร้างช่องทางเข้า – ออกของของเหลว พร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก.....	45
4.2.1.2	การสร้างแม่พิมพ์ของช่องทางเดินจุลภาค.....	47
4.2.1.3	การผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS และการสร้างตัวตรวจรู้เพื่อให้ของเหลวและอนุภาค ไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาคได้.....	51
4.2.1.4	สรุป.....	55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2	การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกระจกแบบที่ 1.....	55
4.2.2.1	การสร้างช่องทางเข้า – ออกของของเหลว พร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก.....	55
4.2.2.2	การสร้างแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1.....	56
4.2.2.3	การผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS และการสร้างตัวตรวจรู้เพื่อให้ของเหลวและอนุภาค ไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาคได้.....	60
4.2.2.4	สรุป.....	64
4.2.3	การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกระจกแบบที่ 2.....	65
4.2.3.1	การสร้างช่องทางเข้า – ออกของของเหลว พร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก.....	65
4.2.3.2	การสร้างแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 2.....	66
4.2.3.3	การผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS และการ สร้างตัวตรวจรู้เพื่อให้ของเหลวและอนุภาค ไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาคได้.....	68
4.2.3.4	สรุป.....	72
5	ผลการทดสอบการนับจำนวนอนุภาคซึ่งแขวนลอยในสารละลาย.....	73
5.1	การทดลองนับจำนวนอนุภาคโพลีเมทราไคลเลท.....	79
5.2	ผลการนับจำนวนอนุภาคโพลีเมทราไคลเลท.....	80
5.2.1	ผลการนับจำนวนอนุภาค กรณีที่ 1.....	80
5.2.2	ผลการนับจำนวนอนุภาค กรณีที่ 2.....	83
5.2.3	ผลการนับจำนวนอนุภาค กรณีที่ 3.....	89
5.2.4	ผลการนับจำนวนอนุภาค กรณีที่ 4.....	94
5.3	สรุป.....	99

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	100
6.1	สรุป.....	100
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	101
	รายการอ้างอิง.....	102
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. กระบวนการเจาะรูกระจก.....	105
	ภาคผนวก ข. กระบวนการสร้างแม่พิมพ์นิกเกิลของช่องทางเดินจุลภาค.....	108
	ภาคผนวก ค. กระบวนการสร้างขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก.....	113
	ภาคผนวก ง. กระบวนการสร้างช่องทางเดินจุลภาค.....	115
	ภาคผนวก จ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	118
	ประวัติผู้เขียน.....	120

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาคเมื่ออนุภาคอยู่ภายใน.....	77
5.2 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 22 อนุภาค/1.8 μ l.....	88
5.3 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 44 อนุภาค/1.8 μ l.....	93
5.4 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 66 อนุภาค/1.8 μ l.....	98

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของลำแสงเลเซอร์ ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer diffraction).....	9
2.2 หลักการวัดอิมพีแดนซ์.....	12
2.3 โครงสร้างของแบบที่ 1.....	15
2.4 โครงสร้างของแบบที่ 2.....	15
2.5 ภาพตัดขวางของตัวตรวจรู้.....	18
3.1 ภายในช่องทางเดินจุลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์มี 1 อนุภาค ($n = 1$).....	20
3.2 ลักษณะเส้นแรงของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด.....	21
3.3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของช่องทางเดินจุลภาคขณะมี n อนุภาคอยู่ภายใน.....	22
3.4 ภายในช่องทางเดินจุลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์มี 2 อนุภาค ($n = 2$).....	24
3.5 ภายในช่องทางเดินจุลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์มี 3 อนุภาค ($n = 3$).....	25
3.6 ภายในช่องทางเดินจุลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์มี 1 อนุภาค ($n = 1$).....	27
3.7 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค ($n = 1$).....	29
3.8 ภายในช่องทางเดินจุลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์มี 2 อนุภาค ($n = 2$).....	31
3.9 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของช่องทางเดินจุลภาคมี 2 อนุภาค ($n = 2$).....	32
3.10 อนุภาคจำนวน 3 อนุภาคอยู่ภายในช่องทางเดินจุลภาค.....	35
3.11 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของช่องทางเดินจุลภาคมี 3 อนุภาค ($n = 3$).....	35
4.1 ตัวตรวจรู้ที่สร้างโดยบริษัทผลิตแผ่นวงจรพิมพ์เชิงพาณิชย์.....	39
4.2 โครงสร้างตัวตรวจรู้ที่ประกอบเสร็จแล้ว.....	39
4.3 ขั้นตอนการสร้างช่องทางเดินจุลภาค.....	40
4.4 ช่องทางเดินจุลภาคที่สร้างด้วยฟิล์มแห้ง.....	41
4.5 แผ่นกระจกที่เจาะรูด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก เข้มข้น 48%.....	41
4.6 ขั้นตอนการบอนด์ช่องทางเดินจุลภาคกับแผ่นปกคลุม.....	42
4.7 บอนด์ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 60 นาที น้ำหมึกสีแดงไม่สามารถซึมออกได้.....	43
4.8 น้ำหมึกสีแดงสามารถซึมออกจากช่องทางเดินจุลภาคได้.....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ช่องทางเดินจุลภาคบนแผ่นวงจรพิมพ์.....	43
4.10 บอนด์ที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 60 นาที น้ำหมึกสีแดงสามารถซึมออกด้านข้างได้.....	44
4.11 ขั้นตอนการยิงทราย.....	46
4.12 ทางเข้า - ออกของของเหลวบนแผ่นกระจก.....	46
4.13 ขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก.....	47
4.14 แบบแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคที่ออกแบบด้วยโปรแกรมวาดลวดลาย LASI.....	47
4.15 กระบวนการสร้างแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาค ด้วยสารไวแสงโฟโตริซิชันดิลบ SU-8.....	48
4.16 ภาพมวณิกเกิดล้นจากแม่พิมพ์โครงสร้าง SU-8.....	48
4.17 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 500.....	49
4.18 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,200.....	49
4.19 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยผ้าขัด DP Nap.....	50
4.20 ภาพชิ้นงานแม่พิมพ์นิกเกิดช่องทางเดินจุลภาค.....	50
4.21 การผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS.....	51
4.22 ช่องทางเดินจุลภาคที่สร้างโดยใช้ซิลิโคน PDMS.....	52
4.23 การบอนด์ระหว่าง PDMS ที่ทำเป็นช่องทางเดินจุลภาค กับแผ่นกระจกที่มีทางเข้า - ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรด.....	53
4.24 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ช่องทางเดินจุลภาคกว้างประมาณ 90 μm และมีความสูงประมาณ 50 μm.....	53
4.25 ภาพทดสอบการไหลของน้ำหมึกสีแดงมีของเหลวซึมออกด้านข้าง.....	54
4.26 ภาพทดสอบการไหลของน้ำหมึกสีแดงไม่มีของเหลวซึมออกด้านข้าง.....	54
4.27 ภาพตัวตรวจรูสร้างจากแม่พิมพ์นิกเกิดบนแผ่นกราฟไฟต์.....	54
4.28 (ก) ทางเข้า - ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก (ข) ภาพขยายของขั้วอิเล็กโทรด.....	56
4.29 แบบแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคที่ออกแบบด้วยโปรแกรมวาดลวดลาย LASI.....	57
4.30 กระบวนการสร้างแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาค ด้วยสารไวแสงโฟโตริซิชันดิลบ SU-8.....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 ภาพมวณิกเกิดล้นจากแม่พิมพ์โครงสร้าง SU-8.....	58
4.32 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,200.....	59
4.33 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยผ้าขัด DP Nap.....	59
4.34 ภาพชิ้นงานแม่พิมพ์นิกเกิดช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1.....	59
4.35 การผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 โดยใช้ซิลิโคน PDMS.....	60
4.36 (ก) ก่อนลอกซิลิโคน PDMS ออกจากแม่พิมพ์ (ข) ช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 ทำด้วยซิลิโคน PDMS.....	61
4.37 การบอนด์ระหว่าง PDMS ที่ทำเป็นช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 กับแผ่นกระจกที่มีทางเข้า - ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรด.....	62
4.38 ตัวตรวจรู้ของช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1.....	63
4.39 ทดสอบการไหลของน้ำหมึก โดยไม่มีของเหลวซึมออกด้านข้าง.....	63
4.40 (ก) ตัวตรวจรู้ที่ยังไม่เชื่อมต่อสายไฟ (ข) ตัวตรวจรู้ที่เชื่อมต่อสายไฟ.....	64
4.41 ของเหลวและอนุภาคผ่านช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 ได้ และมือนุภาคบางส่วนติดอยู่ที่ผนังของช่องทางเดิน.....	64
4.42 (ก) รูปทางเข้า - ออกของของเหลวที่มีขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก (ข) ภาพขยายของขั้วอิเล็กโทรด.....	65
4.43 แบบแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคที่ออกแบบด้วยโปรแกรมวาดลวดลาย LASI.....	66
4.44 มวณิกเกิดล้นจากแม่พิมพ์โครงสร้าง SU-8.....	67
4.45 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,200.....	67
4.46 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยผ้าขัด DP Nap.....	68
4.47 ภาพชิ้นงานแม่พิมพ์นิกเกิดช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 2.....	68
4.48 ช่องทางเดินจุลภาคที่ล้อมรอบด้วยแผ่นอลูมิเนียม.....	69
4.49 นำ PDMS เข้าใน โถดูดความชื้น.....	69
4.50 PDMS ที่ลอกออกจากแบบแล้ว.....	70
4.51 (ก) ช่องทางเดินจุลภาคที่ทำการบอนด์เรียบร้อยแล้ว (ข) ช่องทางเดินจุลภาคที่ทำการเชื่อมต่อสายขั้วบริเวณทางเข้า - ออก ของของเหลวที่สามารถนำไปใช้ในการทดสอบ.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 ภาพมวณิกเกิดล้นจากแม่พิมพ์โครงสร้าง SU-8.....	58
4.32 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,200.....	59
4.33 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยผ้าขัด DP Nap.....	59
4.34 ภาพชิ้นงานแม่พิมพ์นิกเกิดช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1.....	60
4.35 การผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 โดยใช้ซิลิโคน PDMS.....	61
4.36 (ก) ก่อนลอกซิลิโคน PDMS ออกจากแม่พิมพ์ (ข) ช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 ทำด้วยซิลิโคน PDMS.....	62
4.37 การบอนด์ระหว่าง PDMS ที่ทำเป็นช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 กับแผ่นกระจกที่มีทางเข้า – ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรด.....	63
4.38 ตัวตรวจรู้ของช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1.....	63
4.39 ทดสอบการไหลของน้ำหมึก โดยไม่มีของเหลวซึมออกด้านข้าง.....	64
4.40 (ก) ตัวตรวจรู้ที่ยังไม่เชื่อมต่อสายไฟ (ข) ตัวตรวจรู้ที่เชื่อมต่อสายไฟ.....	64
4.41 ของเหลวและอนุภาคผ่านช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 ได้ และมือนุภาคบางส่วนติดอยู่ที่ผนังของช่องทางเดิน.....	64
4.42 (ก) รูปทางเข้า - ออกของของเหลวที่มีขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก (ข) ภาพขยายของขั้วอิเล็กโทรด.....	65
4.43 แบบแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคที่ออกแบบด้วยโปรแกรมวาดลวดลาย LASI.....	66
4.44 มวณิกเกิดล้นจากแม่พิมพ์โครงสร้าง SU-8.....	67
4.45 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,200.....	67
4.46 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยผ้าขัด DP Nap.....	68
4.47 ภาพชิ้นงานแม่พิมพ์นิกเกิดช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 2.....	68
4.48 ช่องทางเดินจุลภาคที่ล้อมรอบด้วยแผ่นอลูมิเนียม.....	69
4.49 นำ PDMS เข้าใน โถดูดความชื้น.....	69
4.50 PDMS ที่ลอกออกจากแบบแล้ว.....	70
4.51 (ก) ช่องทางเดินจุลภาคที่ทำการบอนด์เรียบร้อยแล้ว (ข) ช่องทางเดินจุลภาคที่ทำการเชื่อมต่อสายขงบริเวณทางเข้า – ออก ของของเหลวที่สามารถนำไปใช้ในการทดสอบ.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.52 ทดสอบการไหลของน้ำหมึก โดยไม่มีของเหลวซึมออกด้านข้าง.....	71
4.53 ทดสอบการไหลของของเหลวและอนุภาคผ่านช่องทางเดินจุลภาค.....	71
5.1 ตัวตรวจรู้ที่ใช้ในการนับจำนวนอนุภาค.....	73
5.2 ชุดทดสอบตัวตรวจรู้ในการนับอนุภาค.....	74
5.3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของชุดตรวจนับอนุภาค.....	74
5.4 ชุดรับสัญญาณของ LabVIEW.....	76
5.5 อนุภาคโพลีเมทราไคลเลท ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 μm	77
5.6 ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค ค่าความต้านทาน 261.73 $\text{k}\Omega$	77
5.7 ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 2 อนุภาค ค่าความต้านทาน 274.05 $\text{k}\Omega$	78
5.8 ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 3 อนุภาค ค่าความต้านทาน 286.18 $\text{k}\Omega$	78
5.9 ขั้วอิเล็กโทรดขาดเนื่องจากการจ่ายแรงดันเกิน 1.3 โวลต์.....	79
5.10 กราฟผลตอบแทนของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0 – 2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 1.....	80
5.11 กราฟผลตอบแทนของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0 – 2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 2.....	81
5.12 กราฟผลต่างของแรงดันกับเวลา ของตัวตรวจรู้ที่ 1 กับตัวตรวจรู้ที่ 2.....	82
5.13 กราฟผลต่างของแรงดันเมื่อผ่านการกรองสัญญาณ ในช่วงความถี่ 55 Hz – 10 kHz ผ่าน.....	82
5.14 ผลการนับจำนวนอนุภาคเป็นศูนย์.....	83
5.15 กราฟผลตอบแทนของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0 – 2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 1.....	84
5.16 กราฟผลตอบแทนของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0 – 2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 2.....	84
5.17 กราฟผลต่างของแรงดันกับเวลา ของตัวตรวจรู้ที่ 1 กับตัวตรวจรู้ที่ 2.....	85
5.18 กราฟผลต่างของแรงดันเมื่อผ่านการกรองสัญญาณ ในช่วงความถี่ 55 Hz – 10 kHz ผ่าน.....	85
5.19 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ +/- 0.026 โวลต์.....	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.20 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.030 โวลต์.....	86
5.21 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.036 โวลต์.....	87
5.22 ผลการนับจำนวนอนุภาคได้ 18 อนุภาค/1.8 μl	88
5.23 กราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0 – 2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 1.....	89
5.24 กราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0 – 2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 2.....	90
5.25 กราฟผลต่างของแรงดันกับเวลา ของตัวตรวจรู้ที่ 1 กับตัวตรวจรู้ที่ 2.....	90
5.26 กราฟผลต่างของแรงดันเมื่อผ่านการกรองสัญญาณ ในช่วงความถี่ 55 Hz – 10 kHz ผ่าน.....	91
5.27 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.026 โวลต์.....	92
5.28 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.030 โวลต์.....	92
5.29 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.036 โวลต์.....	93
5.30 ผลการนับจำนวนอนุภาคได้ 38 อนุภาค/1.8 μl	94
5.31 กราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ ของแรงดันกับเวลา พิจารณาใน ช่วง 0 – 2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 1.....	95
5.32 กราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0 – 2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 2.....	95
5.33 กราฟผลต่างของแรงดันกับเวลา ของตัวตรวจรู้ที่ 1 กับตัวตรวจรู้ที่ 2	96
5.34 กราฟผลต่างของแรงดันเมื่อผ่านการกรองสัญญาณ ในช่วงความถี่ 55 Hz – 10 kHz ผ่าน.....	96
5.35 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.026 โวลต์.....	97
5.36 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.030 โวลต์.....	97
5.37 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.036 โวลต์.....	98
5.38 ผลการนับจำนวนอนุภาคได้ 52 อนุภาค/1.8 μl	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical System : MEMS) คือการรวมองค์ความรู้ ทางด้านเครื่องกล การตรวจรู้ทางไฟฟ้า การตรวจรู้ทางกล และวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ โดยใช้เทคโนโลยีการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำขนาดเล็กระดับไมโครเมตร บนฐานรองซิลิคอน (Silicon substrate) ตัวอย่างเช่น วงจรรวมซีมอส (CMOS), ไบโพลาร์ (Bipolar), ไบซีมอส (BiCMOS) กระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์ทางกลขนาดเล็กนี้เรียกว่า ไมโครแมชชีนนิ่ง (Micromachining) ในการประยุกต์ใช้งานระบบกลไฟฟ้าจุลภาคนั้น เนื่องจากความต้องการอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กประสิทธิภาพดีและราคาถูก ส่งผลให้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคได้รับความสนใจยิ่งขึ้น ไม่เพียงแต่ในด้านงานวิจัยเท่านั้น ยังมีการนำไปใช้ในการผลิตอุปกรณ์เชิงพาณิชย์อีกด้วย ในปัจจุบันเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ได้รับการพัฒนาไปมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดด จากการสืบค้นงานวิจัยตัวตรวจนับอนุภาคที่สร้างขึ้น ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค พบว่ามีผู้ดำเนินการวิจัย ได้แก่ Larsen *et al.*, 1997; Roberts *et al.*, 1999; Satake *et al.*, 2002; Nieuwenhuis *et al.*, 2003; Son *et al.*, 2003 เป็นต้น

อนุภาค (particle) หมายถึง สสารที่มีรูปร่างหลายแบบและมีขนาดเล็กมาก ประกอบด้วยผลึกเดี่ยวหรือหลายผลึก สำหรับละอองไอ (Aerosol) หมายถึง อนุภาคของแข็งหรือของเหลวขนาดเล็กซึ่งแขวนลอยอยู่ในอากาศได้ โดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ 50 ไมโครเมตร ลงไปถึง 1 ไมโครเมตร ซึ่งสิ่งที่ถูกจัดรวมเป็นละอองไอ ได้แก่ ฝุ่นละออง หมอกควัน ละอองน้ำและเมฆหมอก ส่วนผง (powder) นั้นหมายถึง อนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็ก และแห้ง มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1-1,000 ไมโครเมตร (Accolm, 1994) โดยที่ขนาดอนุภาคทั่วไปของวัสดุอยู่ในช่วง 50 นาโนเมตร ถึง 1 เซนติเมตร หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ขนาดของอนุภาคมีช่วงกว้าง อนุภาคอาจมีขนาดใหญ่เท่ากับขนาดของกรวดหยาบ หรือมีขนาดเล็กมากในระดับขนาดของไวรัส ซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า (Reed, 1988) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคมากกว่าหนึ่งเทคนิค เพื่อให้ครอบคลุมขนาดอนุภาคในช่วงที่ต้องการวิเคราะห์ ความก้าวหน้าทางเครื่องมือวิทยาศาสตร์ ในปัจจุบันช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์และลดเวลาที่ใช้ไปในการวิเคราะห์ลง ทำให้สามารถนำผลการวิเคราะห์มาใช้ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของข้อมูลผลการวิเคราะห์นั้น

จะขึ้นอยู่กับ การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ รูปร่างและขนาดของอนุภาค ตลอดจนเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ การควบคุมขนาดของอนุภาคมีความจำเป็นในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ผลิตยา น้ำดื่ม เบียร์ ไวน์ และการกำจัดของเสีย เพื่อให้สามารถทำการพัฒนาผลิตภัณฑ์และปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการที่เกี่ยวข้องได้

การนับจำนวนอนุภาคซึ่งแขวนลอยในสารละลาย เช่น การนับจำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดง เม็ดเลือดขาว และเกล็ดเลือด มีความสำคัญอย่างมากในการวินิจฉัยโรคเกี่ยวกับเลือด (Cram *et al.*, 1992; Altendorf, 1997; Yang *et al.*, 1998; Robert *et al.*, 1999; Satake *et al.*, 2002) ได้แก่ โรคมะเร็งในเม็ดเลือดขาว โรคโลหิตจาง และโรคที่เกิดจากการขาดเกล็ดเลือด จึงต้องศึกษาจำนวนปริมาณของเซลล์แต่ละชนิดในเลือด เพื่อหาความสัมพันธ์กับโรคชนิดต่าง ๆ หรือแม้แต่ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการตรวจหาอนุภาคแปลกปลอมในน้ำสะอาด นอกจากนี้ยังนิยมใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การตรวจวิเคราะห์อนุภาคปนเปื้อนในน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรม หลังการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม (Shinichi, 2001) ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ได้พัฒนาเครื่องมือนับจำนวนอนุภาคขนาดเล็กซึ่งแขวนลอยในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมีราคาถูกกว่าเครื่องมือในปัจจุบันที่มีอยู่ในท้องตลาด และสามารถลดต้นทุนการผลิตได้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

สร้างตัวตรวจนับอนุภาคด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) จากนั้นทำการพัฒนาส่วนประมวลผลและแสดงผล

1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น

อนุภาคที่นำมาใช้ในการนับ คือ อนุภาคของโพลีเมทราไคลเลท มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 40 ไมโครเมตร ทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรม LabVIEW ส่วนการวิเคราะห์ผลยังไม่เป็นแบบอัตโนมัติ บางส่วนต้องวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมภายนอก เช่น MATLAB

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้้อนุภาคด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ทำการทดสอบการทำงานของตัวตรวจรู้้อนุภาคที่สร้างขึ้นและประยุกต์ใช้งานโปรแกรม LabVIEW และ MATLAB เพื่อประมวลผลการนับจำนวนอนุภาคของตัวตรวจรู้้อนุภาคที่สร้างขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เครื่องนับจำนวนอนุภาคที่สามารถนับอนุภาคโพสิเทร่าโคลเลทในสารละลาย KCl ได้ และได้แนวทางการพัฒนาเครื่องตรวจนับเม็ดเลือด

1.6 การจัดรูปเล่มของวิทยานิพนธ์

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย 6 บท ในบทที่ 2 กล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงและเป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยต่อไป บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีการตรวจรู้้อนุภาคด้วยวิธีการวัดอิมพีแดนซ์ของสารละลาย บทที่ 4 เป็นกระบวนการพัฒนาช่องทางเดินจุลภาคที่ใช้ในการตรวจรู้้อนุภาค บทที่ 5 ผลการทดสอบการนับจำนวนอนุภาคซึ่งแขวนลอยในสารละลาย บทที่ 6 บทสรุปของงานวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับกระบวนการสร้างและการทดสอบตัวตรวจรู้โดยละเอียดได้สรุปไว้ในภาคผนวก

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการสร้างเครื่องนับจำนวนอนุภาคชนิดต่าง ๆ รวมถึงเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัย และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อาทิเช่น ฐานข้อมูลจาก IEEE IEE (IEL online) IOP และ ScienceDirect เป็นต้น ผลจากการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป

2.2 ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro Mechanical Systems) หรือ MEMS เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจอย่างสูงเมื่อไม่นานมานี้เอง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีการนำความรู้หลากหลายสาขาวิชา ไม่ว่าจะเป็นทางด้านเครื่องกล ไฟฟ้า ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา และวัสดุศาสตร์ มาใช้ร่วมกันในการสร้างส่วนเครื่องกล หรือระบบขนาดเล็กที่มีส่วนของกลไกทางไฟฟ้าและทางกล โดยสร้างขึ้นด้วยเทคนิคการสร้างวงจรรวมทางอิเล็กทรอนิกส์ (Integrated Circuit : IC) และมีขนาดของส่วนต่าง ๆ ที่มีโครงสร้างเล็กระดับไมโครเมตรสามารถทำงานร่วมกันได้

เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคถูกนำมาใช้ในงานต่าง ๆ มากมาย เช่น ในอุตสาหกรรมทางการแพทย์ อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ และการสื่อสารต่าง ๆ เนื่องจากความต้องการอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีประสิทธิภาพสูง และมีราคาถูก เทคโนโลยีนี้จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก และมีการพัฒนาต่อเนื่องตลอดเวลาแบบก้าวกระโดด เพื่อให้สอดคล้องกับสิ่งประดิษฐ์ในอนาคต และเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตซึ่งยังคงความง่ายในกระบวนการ จึงจะทำให้เกิดการผลิตเชิงพาณิชย์ที่เป็นจริงได้ ซึ่งเราจะพบอุปกรณ์ที่ใช้ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคในชีวิตประจำวันมากมาย เช่น หัวฉีดหมึกในเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท หัวอ่านในอุปกรณ์เก็บหน่วยความจำในคอมพิวเตอร์ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ เซนเซอร์วัดความดันเลือดในร่างกาย อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของถุงลมในรถยนต์ และอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ เป็นต้น

เทคนิคการสร้างโครงสร้างขนาดเล็กในระบบกลไฟฟ้าจุลภาคยังแบ่งออกเป็น 4 เทคนิคหลัก ๆ ได้แก่ การสร้างแบบสลักหรือแบบกัด (bulk micromachining) การสร้างแบบแผ่นผิว (surface micromachining) การสร้างโดยการยึดประกบของชั้น (bonding) และการสร้างแบบชั้นหนา (high-aspect-ratio micromachining) การสร้างโครงสร้างที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในระดับไมโครเมตรต้องอาศัยเทคนิคการสร้างแบบ 2 มิติและซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ แทนขณะที่การสร้างชิ้นส่วนหรือโครงสร้างขนาดใหญ่จะใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น การกลึง การไส การกัด การหล่อ การตัด การเจาะ เป็นต้น เทคนิคเหล่านี้สามารถใช้ในการสร้างโครงสร้างแบบ 3 มิติได้ แต่จะทำได้ยากขึ้นเมื่อโครงสร้างเหล่านี้มีขนาดเล็กลง ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคไม่ใช่เพียงเป็นการย่อส่วนเท่านั้น แต่เป็นการสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้เป็นจำนวนมากในเวลาเดียวกัน ทำให้อุปกรณ์เหล่านี้มีราคาถูกลง นอกจากนี้แล้วอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพที่ดีในด้านความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมมากขึ้น มีความแข็งแรงทนทานมากขึ้นเนื่องจากมีน้ำหนักเบา และฉลาดขึ้นเนื่องจากรวมส่วนประมวลผลสัญญาณเข้าไว้ด้วยกัน

ในปัจจุบันนำระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเข้ามาใช้มากในหลาย ๆ อุตสาหกรรม เนื่องจากอุปกรณ์ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค สามารถรวมเอาวงจรอิเล็กทรอนิกส์เข้าไว้ด้วยกันได้ง่ายเพราะวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุประเภทเดียวกันกับวัสดุทางอิเล็กทรอนิกส์และเซมิคอนดักเตอร์ อีกทั้งยังรวมเอาส่วนอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ต่าง ๆ มารวมกันไว้บนชิปตัวเดียวกันได้ เช่น ส่วนตรวจวัด ส่วนประมวลผล และส่วนติดต่อสื่อสาร ข้อมูล เป็นต้น ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคยังสร้างได้เป็นจำนวนมากในเวลาเดียวกัน เช่นเดียวกับเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม ทำให้ราคาถูกลง สามารถใช้แล้วทิ้งได้ในงานบางอย่างที่ไม่ต้องการใช้ซ้ำหรือนำมาทดแทนอุปกรณ์แบบเดิม ซึ่งมีราคาแพงมากกว่าหลายสิบเท่าและต้องทำความสะอาดโดยการฆ่าเชื้อและนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น การตรวจทางการแพทย์ อาทิ การตรวจเลือด ตรวจ DNA หรืออุปกรณ์ตรวจวัดความดัน อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งในเครื่องกระตุ้นหัวใจ นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์วัดความเร่งที่ใช้ในรถยนต์และสามารถใช้ในการงานอื่น ๆ เช่น ระบบการตรวจแผ่นดินไหว (earthquake detection) ระบบตรวจวัดการสั่นสะเทือน (vibration sensing system) เป็นต้น

2.3 เทคนิคการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค

การวิเคราะห์อนุภาคไม่ว่าจะเป็น การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคหรือการนับจำนวนอนุภาคมีความสำคัญอย่างยิ่ง ในการเลือกเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์อนุภาค จำเป็นต้องคำนึงถึงหลายปัจจัย เช่น ช่วงขนาดของอนุภาคที่ต้องการวิเคราะห์ การเตรียมตัวอย่าง ด้านราคา และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ความยาก-ง่ายในการปฏิบัติงาน การซ่อมบำรุง และรูปแบบผลการวิเคราะห์ ไม่ว่าจะอยู่ในลักษณะกราฟหรือตาราง ล้วนเป็นสิ่งสำคัญทั้งสิ้น ซึ่งสิ่งสำคัญที่สุด คือ ผลวิเคราะห์ที่ได้จากเทคนิคที่ใช้ต้องมีประโยชน์และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้สูงสุด

เทคนิคในการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคมีหลายเทคนิค ได้แก่ เทคนิคการแยกขนาดด้วยตะแกรง (sieving techniques) เทคนิคการตกตะกอน (sedimentation techniques) เทคนิคทางแสง (optical techniques) เทคนิคสเปกโทรสโกปีทางอะคูสติก (acoustic spectroscopy) และเทคนิคทางไฟฟ้า (electrical sensing techniques) เป็นต้น ซึ่งแต่ละเทคนิคเป็นการวัดลักษณะเฉพาะของอนุภาคโดยทางอ้อม ดังนั้นผลที่ได้จากแต่ละเทคนิคนั้นอาจให้ค่าที่แตกต่างกัน แต่สิ่งที่สำคัญคือ แต่ละเทคนิคสามารถวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคได้เพียงบางช่วงขนาด และภายใต้สมบัติของอนุภาคในบางสภาวะ เช่น เทคนิคการแยกขนาดด้วยตะแกรงนั้น อาศัยความสามารถของอนุภาคในการลอดผ่านรูเปิดในแต่ละขนาดของตะแกรงที่เบอร์ต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของอนุภาคในการลอดผ่านรูเปิดของตะแกรง เช่น ขนาด รูปร่าง เวลาในการดำเนินการ เป็นต้น สำหรับเทคนิคอื่น ซึ่งมีความซับซ้อนมากขึ้น ต่างก็ดำเนินการวิเคราะห์ภายใต้สมมติฐานของความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับหลักการของอนุภาคภายใต้ตัวกลางที่เป็นของเหลว เช่น หลักการแรงโน้มถ่วง (gravity) และแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal) หรือหลักการความไวต่อไฟฟ้าและการกระเจิงของแสง เป็นต้น

เทคนิคการแยกขนาดด้วยตะแกรง (Sieving techniques) เป็นวิธีการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่เก่าแก่วิธีการหนึ่ง และเป็นเทคนิคที่ยังได้รับความนิยมใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไปและในสายการผลิตขนาดใหญ่ โดยนำแสดนเลสหรือโลหะอื่น ๆ มาถักทอให้มีลักษณะเป็นตาข่ายเพื่อทำเป็นตะแกรง ปัจจุบันสามารถทำตะแกรงโลหะโดยวิธี monolithic electrodeposition ทำให้มีรูเปิดที่สม่ำเสมอและขนาดเล็กเท่ากับ 2 ไมโครเมตร (Reed, 1988) โดยขนาดของตะแกรงจะระบุด้วยขนาดเมช (mesh size) แล้วนำมาวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ โดยตะแกรงที่มีตาห่างที่สุดจะถูวางไว้ด้านบนสุด และมีขนาดลดหลั่นลงมา ตะแกรงที่มีตาถี่ที่สุดจะถูวางไว้ด้านล่างสุด ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์จะผ่านลงไปเป็นชั้นต่าง ๆ นี้โดยการทำให้สั่น หรือ เขย่า และไหลไปจนกระทั่งตัวอย่างไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงได้ เทคนิคนี้สามารถแยกขนาดอนุภาคได้เล็กถึง 44 ไมโครเมตร เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กกว่านี้ จะเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคอย่างหลวม (agglomeration) ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้ การวิเคราะห์โดยใช้ตะแกรงสามารถทำได้ทั้งแบบเปียก (wet analysis) และแบบแห้ง (dry sieve analysis) การวิเคราะห์โดยใช้ตะแกรงทำแบบเปียก โดยนำผงทดสอบใส่ในของเหลวเพื่อป้องกันการเกาะตัวกันของอนุภาค ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยตะแกรงแบบเปียกนี้ ถ้าแยกขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 37 ไมโครเมตร ต้องใช้ปั๊มดูดอากาศช่วยดูดของเหลวและอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก เพื่อให้ผ่านรูเปิดหรือใช้เครื่องสั่นทางกลช่วยในการไหลผ่านของอนุภาคได้ การวิเคราะห์ขนาดโดยใช้ตะแกรงอาจทำแบบแห้ง สามารถใช้แยกอนุภาคที่มีขนาดเล็ก 20 ไมโครเมตร ได้โดยการผสมสารดูดความชื้นที่ทราบขนาดและปริมาณลงในผงทดสอบที่แห้ง เทคนิคการแยกขนาดด้วยตะแกรงนี้ เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และราคาถูก เทคนิคนี้สามารถใช้แยกขนาด

ของอนุภาคได้เพียงหยาบ ๆ เท่านั้น ต้องลงมือทำด้วยตนเอง ทำให้ยากต่อการสอบเทียบ ผลการแยกที่ได้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น สมบัติทางกายภาพของอนุภาค (พื้นผิว) การกระจายขนาดอนุภาคของผง ปริมาณของผงทดสอบบนตะแกรง รูปร่างลักษณะของอนุภาค และความต่อเนื่องของการทดสอบเป็นอย่างมาก อนุภาคที่มีรูปร่างเล็กและยาวจะให้ผลที่แตกต่างเมื่อเทียบกับอนุภาคกลม ๆ ที่มีน้ำหนักเท่ากันและเวลาที่ใช้ในการทดสอบน้อย จะให้ผลที่แตกต่างกับการทดสอบที่ต่อเนื่องยาวนานกว่า ประสิทธิภาพในการแยกด้วยเทคนิคนี้ไม่สูงนัก และประสิทธิภาพของการแยกยังขึ้นกับมาตรฐานของตะแกรง ซึ่งผลิตให้มีความเที่ยงตรงได้ค่อนข้างยาก เพราะโครงตาข่ายทำมาจากเส้นใยโลหะบาง ๆ ทำให้มีโอกาสที่จะแตกหักง่าย หรือเกิดการอุดตันของอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้ผลการวิเคราะห์เกิดความผิดพลาดได้และการทำซ้ำให้ได้ผลเดิมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องเป็นไปได้ยาก

เทคนิคการตกตะกอน (Sedimentation) เทคนิคนี้ใช้หลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาระหว่างอนุภาค และของเหลวในสถานะของแรงโน้มถ่วง โดยตัวอย่างอนุภาคที่แขวนลอยในของเหลวตัวกลางที่ทราบค่าความหนาแน่นและความหนืดด้วยแรงโน้มถ่วง อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะถูกแยกได้เร็วกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กซึ่งจะไปตามกฎของ Stoke (Allen, 1981) โดยทั่วไปอนุภาคตกตะกอนลงที่ก้นภาชนะเว้นแต่อนุภาคเหล่านั้นมีความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลว มันก็จะลอยอยู่ที่บริเวณผิวด้านบน การเตรียมตัวอย่างโดยการเติมผงลงในของเหลวทำได้ 2 วิธี คือ การใส่ตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) โดยผงที่เติมลงไปจะกระจายไปทั่วของเหลวจนเป็นเนื้อเดียวกัน หรือการใส่ตัวอย่างเป็นชั้น (layer) เป็นการใส่ผงตัวอย่างเป็นชั้นบาง ๆ บริเวณผิวน้ำของของเหลว แล้วใช้วิธีการเก็บข้อมูลแบบสะสม ทั้งเทคนิคการวิเคราะห์โดยใช้แรงโน้มถ่วง (gravitational force) และแรงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) เทคนิคนี้มีข้อดีที่ใช้งานง่าย และสามารถแยกอนุภาคได้ครอบคลุมช่วงขนาดอนุภาคตั้งแต่ประมาณ 1 ไมโครเมตร ไปจนถึง 500 ไมโครเมตร แต่เทคนิคนี้ไม่สามารถตรวจวัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ เว้นแต่จะมีความหนาแน่นสูง นอกจากนี้การเคลื่อนที่แบบสุ่มของอนุภาคขนาดเล็กและระยะเวลาในการตกตะกอน ส่วนมากมักจะเกิน 10 นาที หรืออาจนานหลายชั่วโมง สำหรับการนอนก้นของอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากทำให้ผลอาจเกิดความผิดพลาดได้

เทคนิคสเปกโตรสโกปีทางอะคูสติก (Acoustic spectroscopy) เทคนิคนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการวัดขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นสูง อาจจะมีมากถึง 50 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร (Bumiller *et al.*, 1997) โดยใช้หลักการที่ว่า เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านสารแขวนลอยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ เพราะอนุภาคจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง ทำให้เกิดการกระเจิงด้วยระดับพลังงานช่วงอะคูสติก ที่เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความถี่ โดยทั่วไปจะใช้คลื่นไมโครเวฟซึ่งมีความถี่ในช่วง 1–150 MHz ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานของคลื่นที่หายไปที่ความถี่ต่าง ๆ เรียกว่า สเปกตรัมของการลดทอน (attenuation spectra) ซึ่งมีลักษณะเฉพาะในสารแต่ละชนิด ดังนั้นจึงบอกลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคได้

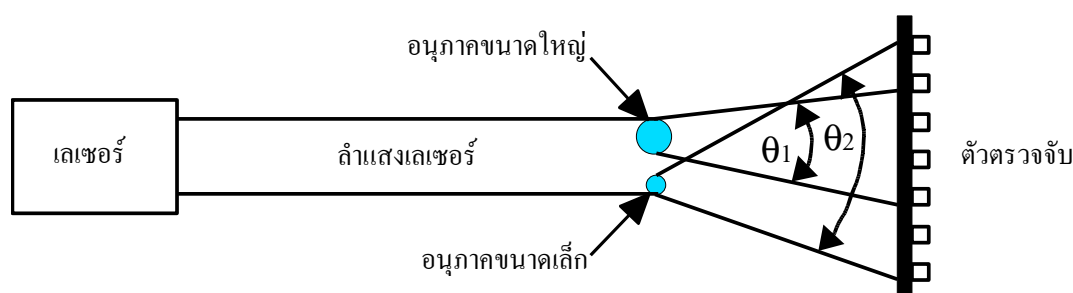
การที่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงพลังงานของคลื่นเสียงได้อย่างแม่นยำในช่วงความถี่ต่าง ๆ ทำให้สามารถวัดขนาดอนุภาคได้ในช่วง 0.01–1,000 ไมโครเมตร ที่ความเข้มข้น 0.5–50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้การตรวจสอบการเกาะกันของอนุภาค การวัดขนาด และการกระจายขนาดทำได้ง่ายขึ้น

Microscope counting เทคนิคนี้เป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์ในการทำงาน ผู้ใช้งานสามารถแยกขนาดอนุภาคได้ด้วยระบบการมองเห็นและทำการนับด้วยตนเอง ระบบการนับอนุภาคแบบอัตโนมัติ (กล้องวิดีโอหรือคอมพิวเตอร์) ได้ถูกนำเข้ามาใช้เพื่อกำจัดงานที่น่าเบื่อสำหรับการวิเคราะห์แบบนี้ นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้เข้ามามีบทบาทในการสร้างภาพของอนุภาคอีกด้วย ทำให้เทคนิคนี้สามารถตรวจวัดอนุภาคแบบ on-line ได้ วัฒนาการของกล้องจุลทรรศน์ทำให้ผู้ใช้งานสามารถมองเห็นรูปร่าง ขนาด และข้อมูลต่าง ๆ ของอนุภาคได้อย่างสมจริงมากกว่าเทคนิคอื่น ๆ แต่ Microscope counting มีข้อเสียที่ข้อมูลที่ได้อาจมีความน่าเชื่อถือไม่เพียงพอ เช่น อนุภาคตัวหนึ่งมีขนาด 30 ไมโครเมตร อาจไม่ถูกตรวจนับถ้ามีน้ำหนักร่วมกับอนุภาคขนาด 1 ไมโครเมตร ที่มีอยู่ 27,000 ตัว หรืออาจจะไม่สามารถตรวจนับได้ ถ้าอนุภาค 2 ตัวอยู่ติดกัน เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ต้องมีการเตรียมตัวอย่างก่อน และยังมีค่าใช้จ่ายสูงอีกด้วย

เทคนิคทางแสง (Optical techniques) เทคนิคนี้สามารถนับและวัดขนาดของอนุภาคได้อย่างรวดเร็ว ใช้ตัวอย่างทดสอบในปริมาณน้อย และเมื่อทำการทดสอบตัวอย่างด้วยเทคนิคนี้หลายครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน (reproducibility) เทคนิคนี้สามารถวัดขนาดอนุภาคในช่วง 0.1-1,000 ไมโครเมตร เทคนิคนี้ต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีราคาแพงมาก เทคนิคทางแสงยังสามารถแยกย่อยออกเป็นเทคนิคต่าง ๆ ได้ดังนี้

เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Laser diffraction) เทคนิคนี้จะอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของแสง ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ เลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne gas laser) ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 0.63 ไมโครเมตร (Ward-Smith, 2000, Yang *et al.*, 1998) เมื่อมีอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางผ่านลำแสงชั่วระยะเวลาหนึ่ง โดยการ ใช้สมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer approximation) ความเข้มของแสงที่เกิดการเลี้ยวเบนมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอนุภาคในแต่ละขนาด แต่มุมเลี้ยวเบนกลับ เป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค ดังรูปที่ 2.1 การใช้ตัวตรวจจับทางแสง เลนส์และตัวกรองแสง ร่วมกับคอมพิวเตอร์ ช่วยให้สามารถประมวลผลจากข้อมูลการเลี้ยวเบนเป็นการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้ เทคนิคนี้ไม่จำเป็นต้องทราบความหนาแน่นของวัสดุทดสอบ แต่อนุภาคที่มีขนาดเล็กเกินช่วงที่ความสามารถของเครื่องตรวจจับจะไม่ได้รับการบันทึก สมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์มีข้อจำกัดตรงที่อนุภาคต้องมีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของแสง ที่ใช้วัดถ้าใช้เลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียม – นีออน อนุภาคควรมีขนาดใหญ่กว่า

25 ไมโครเมตร (Allen, 1981) อนุภาคต้องทึบแสงและอนุภาคทุกขนาดต้องกระเจิงแสงออกไปอย่างมีประสิทธิภาพเท่ากัน ข้อจำกัดนี้เอง ทำให้การวัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กใกล้ความยาวคลื่นของแสงเกิดความคลาดเคลื่อนจึงได้มีการนำทฤษฎีของ Mie (Mie theory) มาใช้ในการพิจารณาเพื่อวัดขนาดอนุภาคในช่วง 0.1–2,000 ไมโครเมตร แต่ทฤษฎีนี้ในการทดสอบต้องรู้ค่าดัชนีหักเห (refractive index) ของตัวกลางและวัสดุทดสอบรวมทั้งค่าดูดซับทางแสงของทั้งสองด้วย (Reed, 1988)



θ_1 คือมุมการเลี้ยวเบนของแสงสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่

θ_2 คือมุมการเลี้ยวเบนของแสงสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก

รูปที่ 2.1 อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของลำแสงเลเซอร์ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer diffraction)

เทคนิค Low Angle Laser Light Scattering จะให้ลำแสงเลเซอร์ผ่านเข้าไปในตัวอย่างทดสอบแล้ว เก็บข้อมูลปริมาณความเข้มแสงที่กระเจิงจากอนุภาคเป็นมุมน้อย ๆ เมื่อเทียบกับแนวของลำแสงเลเซอร์ โดยแสงที่กระเจิงจากอนุภาคที่มีขนาดต่างกันจะมีมุมที่แตกต่างกันออกไป การตรวจวัดและคำนวณปริมาณแสงที่กระเจิงจะใช้ทฤษฎี Mie (Mie theory) เพื่อแยกขนาดของอนุภาคที่มุมต่าง ๆ เทคนิคนี้เหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณความเข้มข้นต่ำ มีการใช้งานอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีข้อดีที่ใช้งานได้ง่าย ใช้เวลาในการวิเคราะห์และให้ข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว ไม่เกิน 1-2 นาที สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งที่เป็นฝุ่นผงและสารแขวนลอย แยกอนุภาคได้หลายขนาด แต่อนุภาคต้องมีขนาดต่างกันอย่างน้อย 15-20 เปอร์เซ็นต์ จึงจะสามารถแยกออกได้และความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเห การดูดกลืนแสง รวมถึงรูปร่างที่ถูกต้อง เช่น ตัวอย่างที่อนุภาคมีคุณสมบัติทางแสงแตกต่างกันออกไปจะทำให้การตรวจวัดยุ่งยากมากยิ่งขึ้น อนุภาคขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างซับซ้อน หรือมีรูพรุน หรืออนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลมจะให้ผลการวัดที่ไม่ถูกต้อง และตัวอย่างที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงจะไม่ทำให้เกิดการกระเจิง เป็นต้น

เทคนิค Photon Correlation Spectroscopy จะมีการทำงานโดยแสงที่กระเจิงจากอนุภาคขนาดเล็ก (น้อยกว่า 4 ไมโครเมตร) จะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มอย่างรวดเร็วโดยขึ้นกับการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (แบบสุ่ม) ของอนุภาค ความเข้มแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงนี้จะสัมพันธ์กับความเร็วของอนุภาค และข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวกับการแยกขนาด โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่เลื่อนตำแหน่ง (translational diffusion coefficient, D_T) ของอนุภาค ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาค (เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ a), (Reed, 1988)

$$a = \frac{(k_B T)}{(3\pi\eta_L D_T)} \quad (2.1)$$

โดยที่ T คือ อุณหภูมิเป็นองศาเคลวิน

L คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของตัวทำละลาย

k_B คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มานน์ (Boltzman constant)

เทคนิคนี้ทำได้ง่ายและรวดเร็ว ต้องการข้อมูลเกี่ยวกับตัวอย่างในการวิเคราะห์น้อย ใช้ตัวอย่างเพียงเล็กน้อยและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ข้อเสียคือ สารตัวอย่างต้องผ่านการเตรียมเพื่อให้ได้ความเข้มขึ้นอย่างเหมาะสม ยังต้องการความสะอาดสูงเนื่องจากป้องกันการรบกวนจากการกระเจิงของฝุ่นหรือสิ่งสกปรก ทั้งยังไม่สามารถแยกอนุภาคได้อย่างถูกต้องเพราะอนุภาคต้องมีขนาดต่างกันถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ข้อมูลที่ได้เป็นเพียงแค่ขนาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอย่างจะต้องมีขนาดเล็กกว่า 4 ไมโครเมตร จึงจะสามารถตรวจวัดได้

Time of Flight Counter เทคนิคนี้ใช้นับตัวอย่างที่เป็นฝุ่นผง หรือสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำที่ผ่านการระเหยออกไป แล้วอากาศที่ประกอบไปด้วยอนุภาคต่าง ๆ จะถูกดึงผ่านหัวฉีดเข้าไปในส่วนที่เป็นสุญญากาศทำให้เกิด supersonic อนุภาคจะถูกเร่งโดยขึ้นกับขนาด อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะถูกเร่งได้เร็วกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ จากนั้นถูกโฟกัสด้วยลำแสงเลเซอร์ 2 ลำ โดยลำแรกจะตรวจวัดและบันทึกเวลาที่แต่ละอนุภาคเริ่มเคลื่อนที่ไปจนถึงเลเซอร์ลำที่สอง นำค่าที่ได้ไปเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของขนาด โดยการจำแนกลงใน bin หลังจากตัวอย่างผ่านไปเพียง 1.5% และถ้ามีการนับที่ช้าซ้อนเกิดขึ้นจะถูกกำจัดออกไปด้วยซอฟต์แวร์ ซึ่งสามารถตรวจนับอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 0.2–700 ไมโครเมตร ใช้เวลาประมาณ 1 นาที แต่จะให้ผลการแยกที่ดีเมื่ออนุภาคมีขนาดตั้งแต่ 0.5 ไมโครเมตรขึ้นไป อนุภาคต้องมีขนาดต่างกันประมาณ 20% จึงจะสามารถแยกได้ แต่สำหรับสารแขวนลอยที่เป็นของเหลวจะทำการตรวจนับด้วยเทคนิคนี้ได้ยาก ในกรณีที่อนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 0.5 ไมโครเมตรจะให้ผลการแยกไม่ค่อยดี และจะไม่สามารถตรวจวัดได้ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 0.2 ไมโครเมตร

Focus-beam refractive measurement เทคนิคนี้จะใช้ probe ในการตรวจวัด เพื่อกำจัดความต้องการในการเตรียมตัวอย่างหรือการเจือจาง โดยใช้ลำแสงเลเซอร์สแกนเส้นรอบวงของอนุภาคหรือโครงสร้างของอนุภาค เมื่อลำแสงตกกระทบอนุภาคจะกระเจิงออกทุกทิศทางทุกทาง แสงที่กระเจิงมายัง probe จะถูกนำมาใช้คำนวณหาความยาวของเส้นคอร์ค่านับพันภายในเวลาไม่กี่วินาที ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนทิศทาง หรือรูปร่างของอนุภาคที่วิเคราะห์ เทคนิคนี้นำไปใช้อย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการทำกระดาษ งานวิจัยด้านชีววิทยา การแพร่ของน้ำหรือน้ำมัน การตกผลึกหรือตะกอน ข้อดีของเทคนิคนี้ คือ ใช้งานง่าย และต้องการการดูแลบำรุงรักษาและการตรวจสอบมาตรฐานเพียงเล็กน้อย

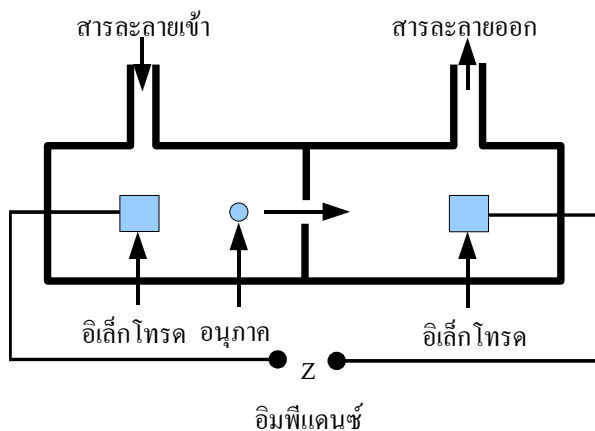
Particle vision and measurement เป็นเทคนิคที่ใช้ probe และ video microscope ที่มีประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูง ในการสร้างภาพผลึกระหว่างที่ทำการวิเคราะห์แสงจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ 6 ตัว กระเจิงมายัง probe จะถูกนำมาใช้ร่วมกับ Charge-Coupled Detector (CCD) ในการสร้างภาพ ภาพที่ได้จะมีขนาด 860 x 645 ไมโครเมตร และสามารถแจกแจงรายละเอียดได้ประมาณ 3-5 ไมโครเมตร ซอฟต์แวร์สามารถบันทึกภาพได้ 10 ภาพต่อวินาที ภาพเหล่านี้จะช่วยแสดงรูปร่างขนาดและโครงสร้างของอนุภาค

Flow cytometry เป็นการนับและแยกเซลล์อีกเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้กัน (Ormerod, 1994) ซึ่งในบางการทดลอง ที่มีความจำเป็นในการแยกเซลล์ชนิดใดชนิดหนึ่งออกจากเซลล์อื่น ๆ ซึ่งถ้าเซลล์ที่ปนกันอยู่มีความแตกต่างทางกายภาพอย่างชัดเจน เช่น เซลล์เม็ดเลือดขาวกับเซลล์เม็ดเลือดแดง เนื่องจากเซลล์เม็ดเลือดแดงไม่มีนิวเคลียส ทำให้มีความหนาแน่นต่างกัน จึงสามารถปั่นเหวี่ยงแยกเซลล์ตามความหนาแน่นได้ง่าย แต่ส่วนมากแล้วการแยกเซลล์ที่มีคุณสมบัติพิเศษอื่น ๆ นอกจากจะทำได้ยากแล้ว จึงต้องมีเทคนิคอื่นที่ใช้ในการแยกประเภทของเซลล์ต่าง ๆ ออกจากกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ flow cytometry ก็เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์เซลล์ด้วยการฉายแสงเลเซอร์ลงสู่เซลล์แล้ววัดการเรืองแสงที่เกิดขึ้น ตามหลักการทางฟิสิกส์ ชีวเคมี และคุณสมบัติทางภูมิคุ้มกัน เพื่อใช้ในการคัดแยกเซลล์ ซึ่งนอกจากจะสามารถแยกเซลล์ได้เพียง 1 เซลล์ จากจำนวนเซลล์นับพัน ๆ แล้วยังสามารถใช้ในการวัดปริมาณของเซลล์ หาขนาด และรูปร่าง ของเซลล์ชนิดนั้น ๆ ได้อีกด้วย

หลักการการทำงานของ flow cytometry การทำงานของเทคนิคนี้ คือ การนำสีย้อมเรืองแสงมาติดฉลากเชื่อมเข้ากับแอนติบอดี ที่มีความจำเพาะกับโมเลกุลบางโมเลกุล บนพื้นผิวของเซลล์ชนิดนั้น หรือออร์แกเนลล์ที่สนใจ เช่น ดีเอ็นเอ เมื่อนำ mixture ของเซลล์ต่าง ๆ มาทำปฏิกิริยากับฟลูออเรสเซนต์แอนติบอดี (fluorescent antibody) นั้น ฟลูออเรสเซนต์แอนติบอดีก็จะไปจับกับเซลล์หรือโมเลกุลที่เราน่าสนใจเท่านั้น จากนั้นเรานำเซลล์แขวนลอยที่ได้ใส่เข้าไปในเครื่อง FACS (fluorescent activated cell sorter) โดยทำการผสมเซลล์ร่วมกับบัฟเฟอร์ที่เรียกว่า sheat fluid เพื่อนำเข้าสู่หัวฉีดที่จะบังคับให้เซลล์แขวนลอยเหล่านี้ จะวิ่งเป็นสายของเซลล์เดี่ยว ๆ ผ่านลำแสงเลเซอร์ซึ่งกระตุ้นการเรืองแสงของ

สีย้อม ทำให้เซลล์ที่จับตัวกับสาร fluorescent antibody เกิดการเรืองแสงขึ้น ปริมาณการเรืองแสงของแต่ละเซลล์หรือโมเลกุลนั้นจะถูกตรวจวัดและแปลค่าเป็นปริมาณของเซลล์หรือโมเลกุลนั้น ๆ ด้วยอุปกรณ์วัดการตอบสนองที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะใช้ photomultiplier tube ตรวจจับการเรืองแสงที่กระจายจากแต่ละเซลล์หรือโมเลกุลเป็นกระแสไฟฟ้าซึ่งจะถูกแปลงเป็นค่าทางดิจิทัลและถูกส่งเข้าไปสู่คอมพิวเตอร์แปลเป็นขนาดและรูปร่างของเซลล์หรือโมเลกุลนั้น ๆ

เทคนิคทางไฟฟ้า (Electrical sensing techniques) วิธีการของ Electrical sensing zone หรือที่เรียกกันว่าหลักการของ Coulter เสนอโดย Walter H. Coulter ในปี 1950 ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (Robert *et al.*, 1999) เป็นวิธีที่ใช้ในการตรวจนับจำนวนอนุภาคซึ่งกระจายตัวในของเหลว หรือที่เรียกว่าสารแขวนลอย ที่ต้องทำให้เป็นสารแขวนลอยอิเล็กโทรไลต์ การนับจำนวนอนุภาคทำได้โดยการแบ่งตัวเซนเซอร์ (sensor) ออกเป็น 2 ด้าน ผนังกันด้านทั้งสองมีช่องเปิดเล็ก ๆ ให้สารละลายสามารถไหลผ่านไปได้ ในแต่ละด้านของเซนเซอร์มีอิเล็กโทรดวางอยู่ โดยปกติอิมพีแดนซ์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจะมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของสารละลาย แต่เมื่อมีอนุภาคไหลผ่านช่องเปิดจะทำให้อิมพีแดนซ์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไป เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วทั้งสอง เมื่ออนุภาคผ่านช่องเปิดนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานจะเป็นสัดส่วนกับปริมาตรของอนุภาคที่เข้าไปแทนที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์หรือขนาดอนุภาค จะทำให้เกิดพัลส์ทางไฟฟ้าขึ้นและสามารถนำไปนับจำนวนอนุภาคได้ ข้อดีของเทคนิคนี้คือ การวิเคราะห์ไม่ขึ้นกับรูปร่าง สี ความหนาแน่น และค่าดัชนีหักเหของอนุภาคตัวอย่าง ซึ่งเป็นการลดความคลาดเคลื่อนจากค่าต่าง ๆ เหล่านี้ แต่ข้อเสียคือ ช่องเปิดจะต้องมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดอนุภาค จึงจะสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.2 หลักการวัดอิมพีแดนซ์

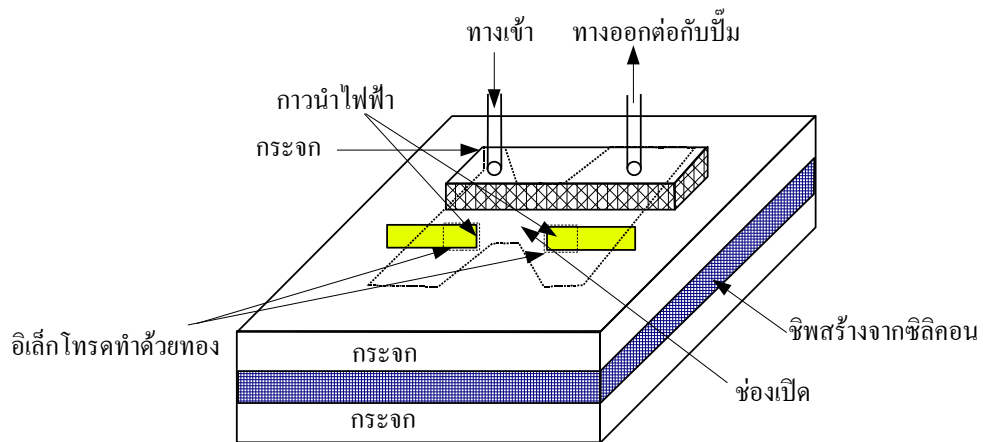
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัย การนับจำนวนอนุภาคซึ่งแขวนลอยในสารละลายด้วยเทคนิคทางไฟฟ้า หรือที่เรียกว่าหลักการของ Coulter ได้มีการค้นคว้าและพัฒนาวิธีการออกแบบและการสร้างแบบใหม่ขึ้นอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และเพื่อลดข้อจำกัดด้านต่าง ๆ ลง ในงานวิจัยระยะเริ่มแรก นับจำนวนอนุภาคโดยใช้หลักการของ Coulter ซึ่งค้นพบเป็นคนแรก โดย Walter H. Coulter ในปี 1950 (Coulter, 1956) ได้สร้างอุปกรณ์นับจำนวนอนุภาคและนับจำนวนเซลล์เม็ดเลือด ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในทางการแพทย์ เลือดมีความสำคัญกับสุขภาพของคนเรา และการวิเคราะห์ลักษณะของคนไข้ ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการตรวจวินิจฉัยโรค เลือดประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ ส่วนที่เป็นของเหลวและส่วนที่เป็นเซลล์ เซลล์ในเลือดมี 3 ชนิด คือ เม็ดเลือดขาว มีขนาด 10-20 ไมโครเมตร เม็ดเลือดแดงมีขนาด 6-10 ไมโครเมตร และเกร็ดเลือดมีขนาดเล็กที่สุดคือ 2-5 ไมโครเมตร ส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่า พลาสมา เซลล์เม็ดเลือดขาวยังแบ่งได้อีกหลายชนิด คือ lymphocytes, monocyte, neutrophils, and eosonophil (Walters *et al.*, 1996) เม็ดเลือดแดงทำหน้าที่นำออกซิเจนไปเลี้ยงเซลล์ของเลือด เม็ดเลือดขาวทำหน้าที่ปกป้องต่อต้านการติดเชื้อและมะเร็ง และเกร็ดเลือดช่วยในการแข็งตัวของเลือด หรือแม้แต่อนุภาคขนาดเล็กในทางชีววิทยาก็มีผลต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม เช่น คนอเมริกันมากกว่า 35 ล้านคนเป็นโรคภูมิแพ้ในช่องจมูกอักเสบหรือในทางเดินหายใจ รู้จักกันดีในชื่อ “hey fever” หรือโรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ โดยมีสาเหตุมาจากจำนวนของอนุภาคของฝุ่นละอองในอากาศมากผิดปกติ (AHRQ, 2002) ที่คล้าย ๆ กันก็จำพวกอาวุธชีวภาพ เช่น โรคแอนแทรกซ์ ปกติอนุภาคขนาดเล็กจะอยู่ในอากาศและในน้ำ ใช้วิธีการดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ในการหาอนุภาคเพื่อวิเคราะห์หาสารที่ทำให้เกิดโรคภูมิแพ้ ซึ่งมีความสำคัญกับนักวิจัยที่เคยทำกันมาในอดีต Reidiker *et al.*, (2000) เสนอให้ใช้ Silicone ทาน้ำมันหล่อลื่นสำหรับดักจับจำนวนเกสร ซึ่งเป็นเทคนิคการสู่มตัวอย่าง สำหรับการดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ แม้ว่าการตรวจจับด้วยกล้องจุลทรรศน์ต้องใช้เวลาและผู้ดำเนินการต้องมีทักษะชำนาญด้วย Pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry (Py-GC-MS) เป็นวิธีการจำแนกอนุภาคขนาดเล็กทางชีววิทยา (Schenk *et al.*, 1981; De Luca *et al.*, 1986; Papa *et al.*, 1988) อนุภาคในทางชีวเคมีเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน จากนั้นจะเกิดการผสมกับก๊าซและถูกวิเคราะห์โดยเครื่อง MS หรือ GC-MS (Xie *et al.*, 1994) อย่างไรก็ตาม เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่มีใช้กับการนับจำนวนอนุภาคข้างต้น มีขนาดใหญ่ ไม่สามารถพกพาไปไหนมาไหนได้ มีการทำงานที่ซับซ้อนและต้องทำการนับที่ห้องปฏิบัติการ รวมทั้งมีการซ่อมบำรุงอย่างยาวนาน ต้นทุนการผลิตสูงทำให้เครื่องมือมีราคาแพง และด้วยข้อจำกัดนี้เองในยุคต่อมา จึงได้มีการพัฒนาการออกแบบและสร้างเครื่องนับจำนวนอนุภาคให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเป็นทางเลือกของเครื่องมือระดับจุลภาค

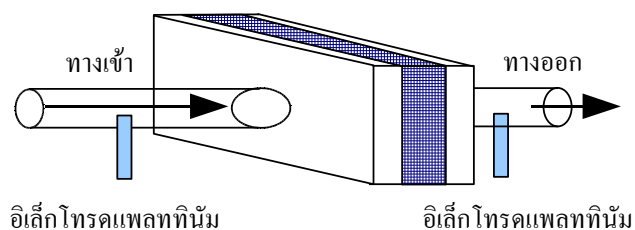
เริ่มต้นจาก Larsen *et al.*, 1997 ได้สร้างอุปกรณ์ขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ระดับไมโครเมตร โดยใช้หลักการทำงานของ Coulter ในการนับจำนวนและขนาดของเซลล์สิ่งมีชีวิต ที่แขวนลอยในสารละลาย โครงสร้างของอุปกรณ์สร้างบนแผ่นซิลิคอน <100> มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว หนา 350 ไมโครเมตร มีชั้นออกไซด์หนา 1.5 ไมโครเมตร ทำลายบนแผ่นซิลิคอน และทำการกัดซิลิคอน โดยใช้กระบวนการกัดแบบ reaction ion etching – RIE ใน SF₆/O₂ พลาสมา ได้ช่องลึก 22 ไมโครเมตร แล้วลอกสารไวแสงโฟโตรีซิสออกและกัดต่อไปอีกลึก 50 ไมโครเมตร เสร็จแล้วก็ทำการกัดอีกด้านโดยการเคลือบด้านที่กัดก่อนหน้านี้ด้วย SiO₂ หนา 1.8 ไมโครเมตร นำไปกัดในโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และหยุดกัดเมื่อช่องทะลุถึงกัน ขั้วอิเล็กโทรดทำด้วยทอง (Au) บนกระจก จากนั้นทำการเชื่อมประกบระหว่างแผ่นซิลิคอนกับแผ่นกระจกด้วยเทคนิค anodic bonding หรือการเชื่อมประกบแผ่นด้วยไฟฟ้า เพื่อทำเป็นช่องทางเดินจุลภาคที่สมบูรณ์ ใช้ Syring-pump ช่วยในการฉีดของเหลวเข้าไปในช่องทางเดินจุลภาคทำให้ควบคุมอัตราการไหลได้คงที่ การควบคุมการไหลของของเหลวใช้หลักการของ Hydrodynamics โดยทดสอบกับอนุภาคของ latex ที่เจือจางในโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) จากผลการทดสอบมีการปรับปรุงความไวการทำงานของ coulter โดยการควบคุมของเหลวได้อย่างแม่นยำในระบบ มีการลดอุปสรรคที่เกิดจากการติดกันของอนุภาค แต่ขั้วอิเล็กโทรดส่วนใหญ่ถูกทำลายเนื่องจากสารละลายของของเหลว

Robert *et al.*, 1999 ได้อธิบายการออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องนับเซลล์เม็ดเลือด โดยใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) ในการสร้างอุปกรณ์ขนาดเล็ก เพื่อที่จะผลิตได้ที่ละมาก ๆ และสามารถที่จะใช้แล้วทิ้งได้เลย สำหรับส่วนวิเคราะห์ผลของเครื่องนับ ซึ่งจะช่วยลดสิ่งเจือปนและปรับปรุงช่องทางในการอ่านให้ดีขึ้น ใช้เทคนิคการวัดอิมพีแดนซ์ หรือหลักการทำงานของ coulter ในการนับจำนวนเซลล์ซึ่งแขวนลอยในสารละลาย โดยได้ออกแบบของโครงสร้างของอุปกรณ์เป็น 2 แบบ โดยแบบที่ 1 ทำบนแผ่นซิลิคอน โดยการเจาะรูซิลิคอนใช้เทคโนโลยีการกัดแบบ dry plasma จะได้รูแบบ rectangular มีความกว้าง 70 ไมโครเมตร ลึก 70 ไมโครเมตร และยาว 100 ไมโครเมตร ซึ่งระหว่างรูจะมีโพรงทั้ง 2 ด้านเพื่อเป็นทางเข้าและทางออกของของเหลว โดยที่ทางออกของโพรงจะมีปั๊มสุญญากาศดูดอยู่เพื่อป้องกันการแพร่กลับของอนุภาครอบ ๆ รู ในส่วนของกระจกซึ่งใช้ปิดบนแผ่นซิลิคอนเพื่อให้ช่องทางเดินจุลภาคสมบูรณ์ โดยทำการเจาะรูกระจก 2 รู เพื่อเป็นทางเข้าและทางออกของของเหลว โดยแต่ละรูมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ใช้การเจาะแบบใช้หัวเพชร และทำการเคลือบ Cr หนา 50 นาโนเมตร ด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง ตามด้วย Ni หนา 20 นาโนเมตร ทั้งสองด้านของกระจก จากนั้นทำการชุบทอง (Au) ลงไป แล้วทำลายเพื่อทำขั้วอิเล็กโทรด เสร็จแล้วนำซิลิคอนและแผ่นกระจกที่เตรียมไว้มาทำการเชื่อมประกบกันด้วยเทคนิคการเชื่อมประกบแผ่นด้วยไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้า 900 โวลต์ เสร็จแล้วก็ทำการต่อท่อที่ทางเข้าและทางออกของรู แสดงในรูปที่ 2.3 จากนั้นทดสอบกับอนุภาคของ latex ที่มีขนาดเท่ากับเซลล์เม็ดเลือดแดง

โดยใช้สารละลาย Phosphate Buffered Saline (PBS) ที่มีค่า pH = 7.4 ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สัญญาณที่ได้จากการนับอนุภาคของ latex ที่ผ่านรูได้สัญญาณที่ต่ำและมีสัญญาณรบกวน และได้ปรับปรุงโดยใช้เทคนิค DSP ในปีเดียวกันงานวิจัยของ Koch *et al.*, 1999 ได้ใช้ซิลิคอนเป็นโครงสร้างของอุปกรณ์ ใช้หลักการทำงานของ coulter ในการวิเคราะห์ผลเช่นเดียวกัน สร้างช่องทางผ่านของของเหลวบนแผ่น ซิลิคอน โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในการกัดขั้วอิเล็กโทรดทำด้วยโลหะไทเทเนียม (Ti) เพื่อใช้ในการตรวจจับและทำการตรวจจับด้วยไฟฟ้าและด้านบนถูกปิดด้วยกระจก สำหรับโครงสร้างของอุปกรณ์แบบที่ 2 ทำการเจาะรูบนแผ่นซิลิคอน ได้รูปทรงปิรามิดทะลุแผ่นซิลิคอน โดยใช้กระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในสารละลาย Ethylene Diamine Pyrocatechol (EDP) ขั้วอิเล็กโทรดทำด้วยโลหะแพลททินัม (Pt) นำแผ่นกระจกซึ่งเจาะรูเป็นวงกลม 2 แผ่นประกบกันด้านบนและด้านล่างของแผ่นซิลิคอนที่เจาะรู จากนั้นทำการต่อท่อเพื่อเป็นทางเข้าและทางออกของของเหลวดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยที่ทางออกมีปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดอนุภาคและสารละลายที่บรรจุอยู่ให้ไหลผ่านไปได้ ผลการทดสอบของแบบที่ 2 ดีกว่าแบบแรก มีสัญญาณที่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องนับจำนวนอนุภาคที่มีใช้ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแบบที่ 1



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแบบที่ 2

Saleh *et al.*, 2001 ได้อธิบายถึงการสร้าง Coulter counter ใช้สำหรับการตรวจนับจำนวนของคอลลอยด์ระดับนาโน ซึ่งแตกต่างจากปีก่อนหน้านี้ อุปกรณ์ทำจากควอตซ์ ใช้เทคนิคการเปลี่ยนแปลงความต้านทานแต่ไม่ได้โฟกัสไปที่จุดศูนย์กลาง และได้ทำการปรับปรุงระบบให้ดีขึ้นในด้านการไหลของของเหลว ช่องทางจุลภาคสร้าง โดยใช้การกัดแบบ RIE ซั้วอิเล็กโทรดทำด้วยโลหะไทเทเนียม (Ti) จากนั้นเคลือบด้วยโลหะแพลททินัม (Pt) ทำการเชื่อมประกบแผ่นด้วยกระจก

Satake *et al.*, 2002 ได้กล่าวถึงวิธีการสร้างเซนเซอร์สำหรับนับเซลล์เลือด มีการพัฒนาโดยใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) ใช้การเปลี่ยนความต้านทานหรือหลักการของ coulter ในการตรวจนับเซลล์เลือด โดยใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้า โครงสร้างของตัวเซนเซอร์ซึ่งทำบนแผ่นซิลิคอน ขนาดของเซนเซอร์คือ 10 มิลลิเมตร x 5 มิลลิเมตร และหนา 0.8 มิลลิเมตร ใช้การกัดซิลิคอนแบบ RIE โดยใช้ก๊าซ SF₆ ความลึกของช่องคือ 45 ไมโครเมตร อิเล็กโทรดทำด้วยแทนทาลัม (Ta) ใช้เป็นชั้นยึดติดจากนั้นเคลือบแพลททินัม (Pt) หนา 200 นาโนเมตร แผ่นกระจกทำการเจาะรูทางเข้าและทางออกของของเหลว จากนั้นทำการเชื่อมประกบแผ่นซิลิคอนกับแผ่นกระจกที่เตรียมไว้แล้ว และต่อท่อตรงช่องทางเข้าและทางออกของตัวเซนเซอร์ ช่องทางออกมีปั๊มสุญญากาศดูดของเหลวออก ทำการทดสอบกับอนุภาคของโพลีสไตรีน ที่มีขนาดแตกต่างกันเพื่อใช้แทนเซลล์เลือด อนุภาคของโพลีสไตรีนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.1 ไมโครเมตร และ 8 ไมโครเมตร ซึ่งใช้เทียบเคียงกับเซลล์เม็ดเลือดแดงและเซลล์เม็ดเลือดขาวตามลำดับ โดยการเจือจางอนุภาคของโพลีสไตรีนในน้ำเกลือ เพื่อลดการเกาะติดกันของอนุภาคต้องทำการเขย่าโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคก่อนทำการวัดและทดสอบกับเซลล์เลือดจริง จากนั้นอ้างอิงผลกับเครื่องนับเซลล์เลือดมาตรฐาน ในกรณีของเซลล์เลือดจริง ความแตกต่างของความสูงของพัลส์ทางไฟฟ้าระหว่างเซลล์เม็ดเลือดแดงกับเซลล์เม็ดเลือดขาวมีขนาดเล็กลง เมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎี อาจเนื่องมาจากเม็ดเลือดขาวหดตัวเนื่องจากอิทธิพลของฮีโมโกลบินและจำนวนของสัญญาณที่ตรวจนับ โดยเซนเซอร์นี้ ประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ เมื่อถูกเปรียบเทียบจำนวนของเซลล์ในตัวอย่างซึ่งมีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงจริง อาจเป็นเพราะระดับความสูงของพัลส์ทางไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจนับที่ตั้งไว้สูงไป จึงเกิดความผิดพลาดและอาจจะเกิดการจับตัวเป็นก้อนของอนุภาคเกิดขึ้น เมื่อสองอนุภาคผ่านรูในเวลาเดียวกัน ยอดของพัลส์กลายเป็นความสูงของสองเท่าของความสูงปกติ ด้วยเหตุผลนี้ทำให้การวัดค่าเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนอนุภาคจริงในกรณีนี้ และวัสดุที่ใช้ทำซั้วอิเล็กโทรดไม่ถูกทำลาย โดยการทำงานของการนับเซลล์เลือดทำให้เซนเซอร์มีศักยภาพในการทำงาน

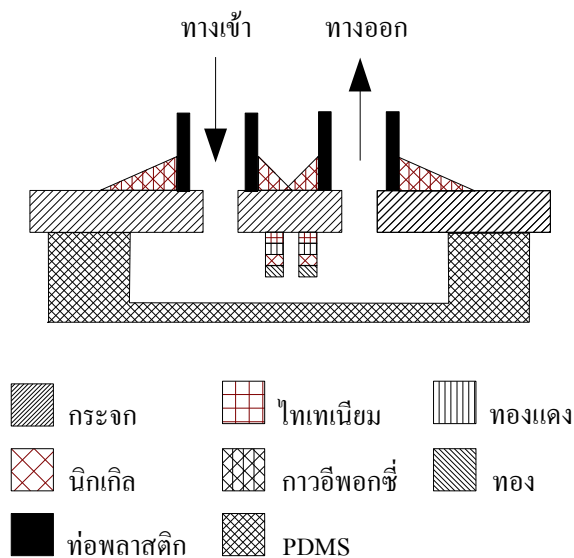
Zhang *et al.*, 2005 ได้ทำการตรวจนับและนับจำนวนละอองเกสร โดยใช้หลักการ ทำงานของ coulter ได้ทำการศึกษา 3 ตัวอย่าง ได้แก่ อนุภาคของโพลีเมทราโคลเลท, ละอองเกสรของต้น Juniperus Scopulorum และละอองเกสรของหญ้าจาก Secale Cerale ซึ่งอนุภาคดังกล่าวแขวนลอยในสารละลาย KCl ซึ่งเป็นสารละลายเซลล์ไฟฟ้าเคมี อนุภาคดังกล่าวไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาค

เกิดการบันทึกผลและทำการวิเคราะห์ผล ซึ่งก่อนหน้าจะใช้เทคนิคการสุ่มตัวอย่าง สำหรับการดูด้วย กล้องจุลทรรศน์ แต่การตรวจนับด้วยกล้องจุลทรรศน์ต้องใช้เวลาและเจ้าหน้าที่ในการปฏิบัติงานต้องมีทักษะด้วย Zhang *et al* ได้สร้างอุปกรณ์ที่พวกเขาได้ในการทดสอบตัวอย่าง วัสดุที่ใช้ในการสร้างคือ PMMA และ เมมเบรน ช่องทางเดินจุลภาคมีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 100 – 200 ไมโครเมตร ขั้วอิเล็กโทรดทำด้วย Ag/AgCl เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ห่างกัน 1 เซนติเมตรจากช่องทางเดินจุลภาค ก่อนจะทำการทดลองต้องทำการเขย่าอนุภาคเพื่อให้แน่ใจว่ากระจายตัวดีแล้ว ขั้วอิเล็กโทรดต่อเข้ากับเครื่อง Gamry Analyzer ซึ่งจ่ายไฟกระแสตรง ได้ 0.2 – 5 โวลต์ เมื่ออนุภาคผ่านช่องทางเดินจุลภาคไปที่ละตัว สามารถตรวจจับพัลส์ของกระแสได้และถูกบันทึกผลโดยเครื่องนี้ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกไปทำการคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางและความเข้มข้นของอนุภาค ผลที่ได้คือ จำนวนพัลส์ของกระแสในช่วงเวลาที่กำหนดเป็นการ นับจำนวนละอองเกสร เมื่อละอองเกสร ผสมกับ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน เป็นการอธิบายถึงการแยกแยะอนุภาคของละอองเกสร และกระแสพัลส์สามารถที่จะบอกขนาดและความเข้มข้นของอนุภาคได้

Lee *et al.*, 2005 นำเสนอตัวตรวจจับความเข้มข้นเซลล์โดยใช้ปริมาตรควบคุมที่ระหว่าง 2 บริเวณตรวจจับทางไฟฟ้า ซึ่งวิธีก่อนหน้าก็คือ การนับจำนวนเม็ดเลือด (Prescott *et al.*, 2002) และ Coulter (Koch *et al.*, 1999) ต้องวัดปริมาตรของเหลวที่แม่นยำและควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ ซึ่ง Lee *et al.*, เสนอตัวตรวจจับความเข้มข้นของเซลล์ โดยไม่มีการวัดความแม่นยำของของเหลวและควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ ซึ่งใช้เซลล์เม็ดเลือดแดงที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ค่า เปรียบเทียบผลการวัดด้วยเครื่องมือที่สร้างขึ้นกับจากเครื่องนับจำนวนเม็ดเลือด สร้างตัวตรวจจับความเข้มข้นเซลล์โดยการสร้างขั้วอิเล็กโทรดบนกระจก ทำการเคลือบโครเมียม (Cr) หนา 500 อังสตรอม และตามด้วยทอง (Au) หนา 1,500 อังสตรอม ด้วยวิธีสปีดเทอริง จากนั้นทำการสร้างโครงสร้างจุลภาค โดยใช้ PDMS โดยใช้เทคนิคการสร้างแบบใช้แม่พิมพ์จุลภาค ซึ่งสร้างบนซิลิคอน โดยใช้สารไวแสงแบบบวก คือ AZ9260 หนา 10 ไมโครเมตร เป็นแบบ จากนั้นนำกระจกที่มีขั้วอิเล็กโทรดและช่องทางเดินจุลภาคที่ทำโดย PDMS มาทำการเชื่อมประกบกันโดยใช้แหล่งกำเนิดความถี่สูงเพื่อทำเป็นช่องทางเดินจุลภาคที่สมบูรณ์ อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมี 2 วิธีที่แตกต่างกัน คือ วิธีที่ 1 ใช้บริเวณตรวจจับทางไฟฟ้าอันเดียว มีอัตราการไหลคงที่ 1.2 ul/min และวิธีที่ 2 ใช้บริเวณตรวจจับทางไฟฟ้า 2 อันและรู้ปริมาตรควบคุม เปรียบเทียบกับเครื่องนับจำนวนเม็ดเลือด ซึ่งวิธีที่ 1 มีค่าความผิดพลาดสูงสุด 8.7% และวิธีที่ 2 มีค่าความผิดพลาดสูงสุด 10.3% ซึ่งอยู่ในช่วงของการวัดความผิดพลาดของเครื่องนับจำนวนเม็ดเลือด

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการวิจัยการนับจำนวนอนุภาคซึ่งแขวนลอยในสารละลาย ด้วยวิธีการวัดอิมพีแดนซ์ของสารละลาย โดยได้ทำการออกแบบ และสร้างชุดนับจำนวนอนุภาคซึ่งแขวนลอยในสารละลาย ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค สามารถสร้างขึ้นได้ในราคาถูก และโครงสร้างของ

ตัวตรวจรู้ไม่ซับซ้อน รวมทั้งวงจรในการตรวจนับด้วย ตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นมีขนาดเล็กและสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก ตัวตรวจรู้นี้ ใช้ทดสอบกับอนุภาคของโพลีเมทราไคลเลท (Polymethacrylate) ซึ่งแขวนลอยในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl 0.01 M) ขนาดอนุภาคของโพลีเมทราไคลเลทที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดใกล้เคียงกับเซลล์เม็ดเลือด เพื่อที่จะพัฒนาไปใช้ในการนับเซลล์เม็ดเลือดได้ ในการสร้างได้ทำการสร้างส่วนของตัวตรวจรู้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยรายละเอียดอยู่ในบทที่ 4 เมื่อสร้างตัวตรวจรู้แล้ว ต้องทำการทดสอบตัวตรวจรู้เพื่อนับจำนวนอนุภาค โดยต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้า และใช้โปรแกรม LabVIEW ในการบันทึกผล จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นำมาทำการนับและแสดงผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวต่อไปในบทที่ 5



รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของตัวตรวจรู้ในงานวิจัยนี้

บทที่ 3

ทฤษฎีในการตรวจรู้อนุภาค

เทคนิคในการวิเคราะห์อนุภาคมีหลายเทคนิค ได้แก่ เทคนิคการแยกด้วยตะแกรง เทคนิคการตกตะกอน เทคนิคทางแสง เทคนิคสเปกโทรสโคปทางอะคูสติก และเทคนิคทางไฟฟ้า ซึ่งแต่ละเทคนิคเป็นการวัดลักษณะเฉพาะของอนุภาคโดยทางอ้อม ตั้งอยู่บนสมมติฐานของแต่ละเทคนิคในการวัด ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอหลักการนับอนุภาคด้วยวิธีการทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการตรวจนับจำนวนอนุภาค ที่กระจายตัวในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของพัลส์ความต้านทาน ที่เกิดจากการไหลของอนุภาคผ่านช่องทางเดินจุลภาค สามารถอธิบายได้จากความสูงของพัลส์ ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของช่องทางเดินจุลภาคและขนาดของอนุภาคที่ทำการวัด โดยกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเพื่อใช้ในการอธิบายผลการทดลอง

3.1 ความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาค

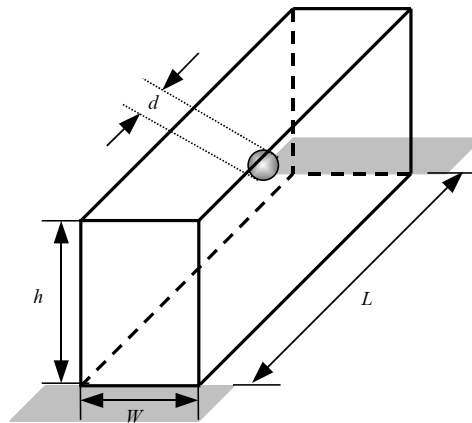
ช่องทางเดินจุลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์บรรจุอยู่ จะมีค่าความต้านทานค่าหนึ่ง เมื่อมีอนุภาคซึ่งแขวนลอยในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่เข้าไปในช่องทางเดินจุลภาค ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้น เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้น มีวิธีการประมาณค่าความต้านทานด้วยกัน 2 วิธี ได้แก่ วิธีแรกเสนอโดยแมกซ์เวลล์ Maxwell, 1904 การประมาณค่าความต้านทานช่องทางเดินจุลภาคด้วยสภาพต้านทานไฟฟ้ายังผลของแมกซ์เวลล์ และวิธีที่สองการประมาณค่าความต้านทานช่องทางเดินจุลภาคด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้า ดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไป

3.1.1 การประมาณค่าความต้านทานช่องทางเดินจุลภาคด้วยสภาพต้านทานไฟฟ้ายังผลของแมกซ์เวลล์

คำตอบของปัญหาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ตามทฤษฎีการประมาณของแมกซ์เวลล์ สมมติว่ามีอนุภาคอยู่ภายในช่องทางเดินจุลภาคจำนวน n อนุภาค ในท่อทรงสี่เหลี่ยมสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาคได้ จากการหาค่าตัวประกอบชดเชย (f_n) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของอนุภาคและปริมาตรของช่องทางเดินจุลภาค ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าอนุภาคต้องมีขนาดเล็กกว่าช่องทางเดินจุลภาคมาก ๆ ในวิทยานิพนธ์นี้จะจำกัดจำนวนอนุภาคโดยทำการพิจารณาที่ $n = 1, n = 2$ และ $n = 3$ เพื่อประมาณค่าความต้านทานช่องทางเดินจุลภาคด้วยสภาพต้านทานไฟฟ้ายังผลของแมกซ์เวลล์

3.1.1.1 ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค ($n = 1$)

ช่องทางเดินจุลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์บรรจุอยู่มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าแทนด้วย ρ_w ซึ่งเป็นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อภายในช่องทางเดินจุลภาคบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และมีอนุภาคทรงกลมขนาดเล็กมากที่ไม่นำไฟฟ้า มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าแทนด้วย ρ_p ซึ่งเป็นของอนุภาค ทำให้มีการปรับค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าจาก ρ_w เป็นค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้ายังผล (effective resistivity) แทนด้วย ρ_{eff} เกิดขึ้น เมื่อมีอนุภาคอยู่ภายใน



รูปที่ 3.1 ภายในช่องทางเดินจุลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์มี 1 อนุภาค ($n = 1$)

จากรูปที่ 3.1 ให้ h คือความสูงของช่องทางเดินจุลภาค W คือความกว้างของช่องทางเดินจุลภาค d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค และ L คือความยาวของช่องทางเดินจุลภาคระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง เมื่อมีปริมาตรบางส่วนที่ไม่นำไฟฟ้าคืออนุภาคบรรจุอยู่ในช่องทางเดินจุลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ายังผล ρ_{eff} ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.1) โดยที่ค่า f_m เป็นตัวประกอบชดเชย หาได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของอนุภาคและปริมาตรของช่องทางเดินจุลภาค

$$\rho_{eff} = \rho_w \left(1 + \frac{3f_m}{2} \right) \quad (3.1)$$

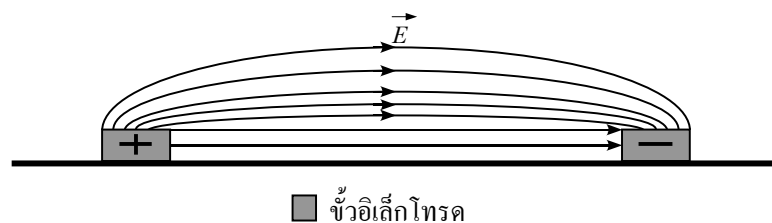
จากรูปที่ 3.1 ปริมาตรของอนุภาคทรงกลมแทนด้วย $V_p = (4/3)\pi(d/2)^3$ และปริมาตรของช่องทางเดินจุลภาคแทนด้วย $V_{ch} = WhL$ สามารถหาค่า f_m ได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.2) ซึ่ง f_m มีค่าอยู่ในช่วง $0 < f_m < 1$

$$f_m = \frac{V_p}{V_{ch}} = \frac{\pi d^3}{6WhL} \quad (3.2)$$

นำค่า f_m ที่ได้จากสมการที่ (3.2) แทนลงในสมการที่ (3.1) จะได้ค่า ρ_{eff} ดังสมการที่ (3.3)

$$\rho_{eff} = \rho_w \left(1 + \frac{\pi d^3}{4WhL} \right) \quad (3.3)$$

จากรูปที่ 3.1 ค่าความต้านทานระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองได้จากการประมาณเนื่องจากว่าเส้นและสนามไฟฟ้า (\vec{E}) มีทิศทางทั้งแบบทางตรงและทางโค้งตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะเส้นแรงของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

โดยแมกซ์เวลล์ได้ทำการประมาณหาค่าความต้านทานจาก $R = \rho L/A$ โดยที่ A คือพื้นที่ภาคตัดขวางของช่องทางเดินจุลภาค (Wh) ดังนั้นจากรูปที่ 3.1 หาค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์บรรจุอยู่เพียงอย่างเดียว แทนด้วยความต้านทาน $R_{ch(0p)}$ หาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.4)

$$R_{ch(0p)} = \frac{\rho_w L}{Wh} \quad (3.4)$$

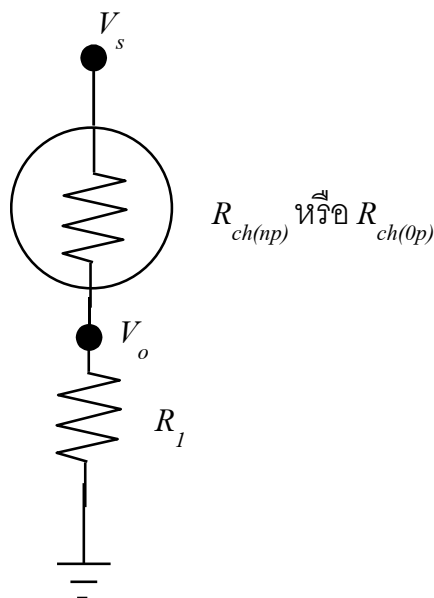
ค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาคบรรจุอยู่ภายในที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์อยู่ด้วย ($n = 0$) แทนด้วยความต้านทาน $R_{ch(np)}$ หาได้จากสมการที่ (3.5)

$$R_{ch(np)} = \frac{\rho_{eff}L}{Wh} = \rho_w \left[\frac{4WhL + \pi d^3}{4W^2h^2} \right] \quad (3.5)$$

ดังนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีอนุภาคอยู่ในช่องทางเดินจุลภาคกับไม่มีอนุภาค อยู่ในช่องทางเดินจุลภาค แทนด้วย ΔR จะได้สมการที่ (3.6)

$$\Delta R = R_{ch(np)} - R_{ch(0p)} = \rho_w \left[\frac{\pi d^3}{4W^2h^2} \right] \quad (3.6)$$

การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจะไม่สามารถทราบได้จากการวัดด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สิ่งที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน จึงถูกทำการวัดด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าแทน โดยใช้หลักการแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างช่องทางเดินจุลภาค ขณะที่อนุภาคอยู่ในช่องทางเดินจุลภาค ดังแสดงในวงจรสมมูลทางไฟฟ้าในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของช่องทางเดินจุลภาคขณะมี n อนุภาคอยู่ใน

โดยที่ V_s คือ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า R_1 คือ ค่าความต้านทานที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง และ $R_{ch(np)}$ คือ ค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาคที่มีอนุภาคผสมอยู่ สามารถคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้า V_o ได้ดังสมการที่ (3.7)

$$V_o = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_{ch(np)}} \right) V_s \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.7) เมื่ออนุภาคอยู่ในช่องทางเดินจุลภาคค่าความต้านทาน $R_{ch(np)}$ จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้า V_o ลดลง แต่เมื่อไม่มีอนุภาคอยู่ในช่องทางเดินจุลภาคค่าแรงดันไฟฟ้า V_o จะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ดังนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีอนุภาคอยู่ในช่องทางเดินจุลภาค หาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าของช่องทางเดินจุลภาคเมื่อไม่มีอนุภาคอยู่ในช่องทางเดินจุลภาค หาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าของช่องทางเดินจุลภาคเมื่อมีอนุภาคอยู่ในช่องทางเดินจุลภาค เขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3.8)

$$\Delta V = \frac{R_1 V_s}{R_1 + \frac{\rho_w L}{Wh}} - \frac{R_1 V_s}{R_1 + \frac{\rho_{eff} L}{WL}} \quad (3.8)$$

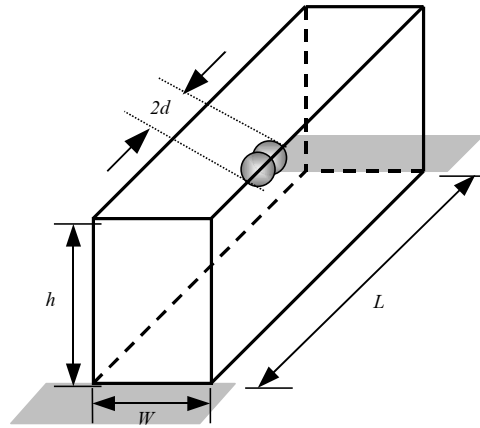
ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า วัดโดยใช้ LabVIEW เข้าสู่คอมพิวเตอร์ และนำข้อมูลที่ได้ ไปทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการนับจำนวนอนุภาคต่อไป

3.1.1.2 ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 2 อนุภาค ($n = 2$)

หลังจากที่ทำการพิจารณาค่า ρ_{eff} เมื่อภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค ($n = 1$) พบว่าค่านี้ขึ้นกับค่า f_m ที่นำมาเป็นตัวประกอบชดเชย จากรูปที่ 3.4 ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 2 อนุภาค ($n = 2$) ดังนั้นปริมาตรของอนุภาคทรงกลมที่ใช้ในการคำนวณต้องทำการคูณด้วยสองเนื่องจากมี 2 อนุภาค เมื่อทำการหาค่า ρ_{eff} ของช่องทางเดิน ต้องทำการคำนวณหา f_m ใหม่สามารถหาค่า f_m ได้ดังสมการที่ (3.9)

$$f_m = \frac{2V_p}{V_{ch}} = \frac{\pi d^3}{3WhL} \quad (3.9)$$

นำค่า f_m ที่ได้จากสมการที่ (3.9) แทนลงในสมการที่ (3.1) จะได้ค่า ρ_{eff} แสดง
 ดังสมการที่ (3.10)



รูปที่ 3.4 ภายในช่องทางเดินจูลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์มี 2 อนุภาค ($n = 2$)

$$\rho_{eff} = \rho_w \left(1 + \frac{\pi d^3}{2WhL} \right) \quad (3.10)$$

จากรูปที่ 3.4 ค่าความต้านทานของช่องทางเดินจูลภาค ที่บรรจุสารละลาย
 อิเล็กโทรไลต์อยู่เพียงอย่างเดียว แทนด้วยความต้านทาน $R_{ch(op)}$ หาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ
 ที่ (3.4) ส่วนค่าความต้านทานของช่องทางเดินจูลภาคที่มี 2 อนุภาคบรรจุอยู่ภายในซึ่งมีสารละลาย
 อิเล็กโทรไลต์อยู่ด้วย แทนด้วยความต้านทาน $R_{ch(np)}$ หาได้ดังสมการที่ (3.11)

$$R_{ch(np)} = \frac{\rho_{eff}L}{Wh} = \rho_w \left[\frac{2WhL + \pi d^3}{2W^2h^2} \right] \quad (3.11)$$

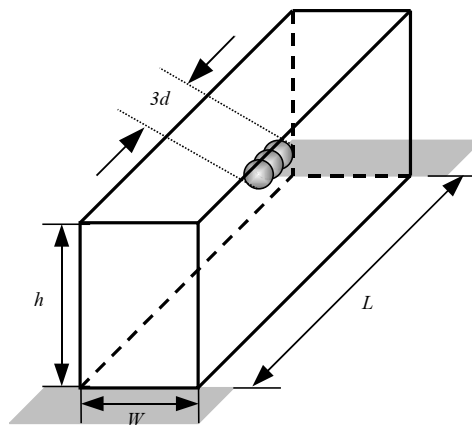
ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของช่องทางเดินจูลภาคเมื่อมีอนุภาค
 กับไม่มีอนุภาคภายในช่องทางเดินจูลภาคแทนด้วย ΔR จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.12)

$$\Delta R = R_{ch(np)} - R_{ch(op)} = \rho_w \left[\frac{\pi d^3}{2W^2h^2} \right] \quad (3.12)$$

จากนั้นเข้าสู่กระบวนการหาผลต่างของแรงดันเมื่อมีอนุภาคกับไม่มีอนุภาคภายในช่องทางเดินจุลภาค เหมือนกับวิธีการหาค่าครมึที่ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาคทุกประการ

3.1.1.3 ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 3 อนุภาค ($n = 3$)

หลังจากที่ทำการพิจารณาค่า ρ_{eff} เมื่อภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค ($n = 1$) และภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 2 อนุภาค ($n = 2$) พบว่าค่านี้ขึ้นกับค่า f_m ที่นำมาเป็นตัวประกอบชดเชย ดังนั้นเมื่อภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 3 อนุภาค ($n = 3$) แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ภายในช่องทางเดินจุลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์มี 3 อนุภาค ($n = 3$)

ปริมาตรของอนุภาคทรงกลมที่ใช้ในการคำนวณต้องทำการคูณสาม เนื่องจากมี 3 อนุภาค เมื่อทำการหาค่า ρ_{eff} ของช่องทางเดินจุลภาค ต้องทำการคำนวณหาค่า f_m ใหม่ สามารถหาค่า f_m ได้ดังสมการที่ (3.13)

$$f_m = \frac{3V_p}{V_{ch}} = \frac{\pi d^3}{2WhL} \quad (3.13)$$

นำค่า f_m จากสมการที่ (3.13) แทนลงในสมการที่ (3.1) จะได้ค่า ρ_{eff} ดังสมการที่ (3.14)

$$\rho_{eff} = \rho_w \left(1 + \frac{3\pi d^3}{4WhL} \right) \quad (3.14)$$

จากรูปที่ 3.5 ค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาค ที่บรรจุสารละลาย อิเล็กโทรไลต์อยู่เพียงอย่างเดียว แทนด้วยความต้านทาน $R_{ch(0p)}$ หาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.4) ส่วนค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาคที่มี 3 อนุภาค บรรจุอยู่ภายในซึ่งมีสารละลาย อิเล็กโทรไลต์อยู่ด้วยแทนด้วยความต้านทาน $R_{ch(np)}$ หาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.15)

$$R_{ch(np)} = \frac{\rho_{eff}L}{Wh} = \rho_w \left[\frac{4WhL + 3\pi d^3}{4W^2h^2} \right] \quad (3.15)$$

ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาคเมื่อมีอนุภาค กับไม่มีอนุภาค ซึ่งแทนด้วย ΔR จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.16)

$$\Delta R = R_{ch(np)} - R_{ch(0p)} = \rho_w \left[\frac{3\pi d^3}{4W^2h^2} \right] \quad (3.16)$$

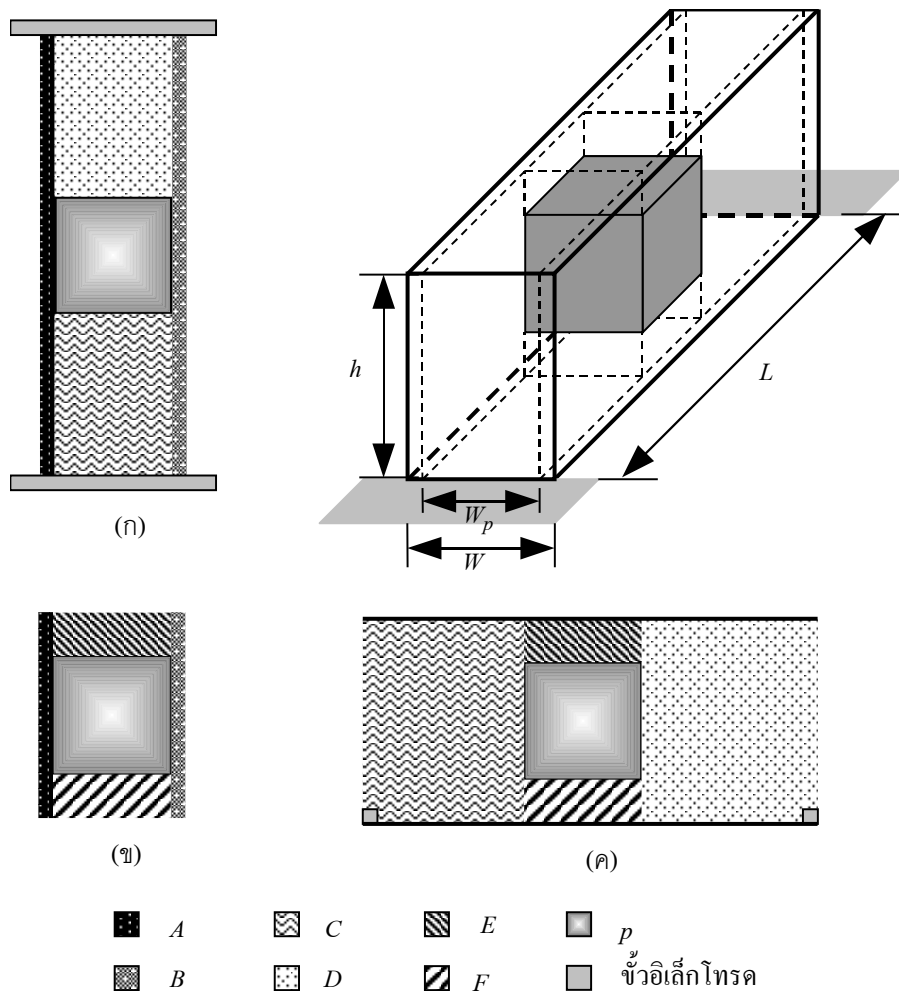
จากนั้นเข้าสู่กระบวนการหาผลต่างของแรงดันเมื่อมีอนุภาคกับไม่มีอนุภาค ภายในช่องทางเดินจุลภาค เหมือนกับวิธีการหากรณีที่อยู่ในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาคทุกประการ เมื่อพิจารณากรณีที่อยู่ในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค 2 อนุภาคและ 3 อนุภาค พบว่าเมื่อค่า f_m เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า ρ_{eff} ค่าผลต่างของแรงดันเพิ่มขึ้นด้วย

3.1.2 การประมาณค่าความต้านทานช่องทางเดินจุลภาคด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้า

จากวิธีการประมาณค่าด้วยสภาพต้านทานไฟฟ้ายังผลของแมกซ์เวลล์พบว่าแมกซ์เวลล์ สมมุติให้อนุภาคมีค่าความต้านทานเป็นศูนย์ แต่ในความเป็นจริงอนุภาคโพลีเมทราโคลเลทที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งแช่อยู่ในน้ำและน้ำต้องมีการแพร่เข้าไปในอนุภาคได้ ดังนั้นค่าความต้านทานไม่น่าจะเป็นศูนย์ และภายใต้เงื่อนไขที่ว่าอนุภาคต้องเล็กกว่าช่องทางเดินมาก ๆ แต่จากในการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ รั้วขนาดของช่องทางเดินจุลภาคและขนาดของอนุภาคซึ่งต่างกันไม่มาก จึงไม่เข้าเงื่อนไขของแมกซ์เวลล์ การประมาณค่าด้วยสภาพต้านทานไฟฟ้ายังผลของแมกซ์เวลล์ จึงไม่น่าจะถูกต้อง คือแมกซ์เวลล์จะให้ค่าที่ใกล้เคียงแต่ไม่ใกล้เคียงมาก เทียบเป็นค่าประมาณได้ เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องมากขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยหลักการสมมูลของวงจรไฟฟ้า หลักการอนุกรมและขนานของค่าความต้านทาน ในการคำนวณค่าได้ประมาณอนุภาคทรงกลมเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่อยู่ในช่องทางเดินจุลภาค และจำกัดจำนวนอนุภาคโดยทำการพิจารณาที่ $n = 1, n = 2$ และ $n = 3$ เพื่อประมาณค่าความต้านทานช่องทางเดินจุลภาคด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้า

3.1.2.1 ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค ($n = 1$)

จากรูปที่ 3.6 ช่องทางเดินจุลภาคมีความกว้างแทนด้วย W มีความยาวแทนด้วย L ความสูงแทนด้วย h และสมมุติให้อนุภาคมีขนาดเท่าสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ก็อยู่ภายในช่องทางเดินจุลภาคมีความกว้างความยาวและความสูงเท่ากับ W_p รูป (ก) มองจากด้านบนของช่องทางเดินจุลภาค รูป (ข) มองจากด้านหน้าของช่องทางเดินจุลภาค และรูป (ค) มองจากด้านข้างของช่องทางเดินจุลภาค ทำการจำลองปริมาตรในแต่ละส่วน โดยทำการแบ่งช่องทางเดินออกเป็น ส่วน ๆ จากการทดลอง ซึ่งในแต่ละส่วนที่มีวัสดุเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์หรือเป็นอนุภาค ให้แทนด้วยความต้านทานของตัวเองและประกอบกันขึ้นเป็นวงจรสมมูล ตัวต้านทานอนุกรมและขนานกัน



รูปที่ 3.6 ภายในช่องทางเดินจุลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์มี 1 อนุภาค ($n = 1$)

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.6 พบว่าปริมาตรบริเวณ A ซึ่งเป็นส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแทนด้วย ρ_w และแทนด้วยความต้านทานเป็น R_A มีค่าความต้านทาน ดังสมการที่ (3.17) ซึ่งปริมาตรบริเวณ B มีความต้านทานเท่ากับความต้านทาน R_A ด้วย

$$R_A = \frac{\rho_w L}{h(W - W_p)/2} = R_B \quad (3.17)$$

โดยปริมาตรบริเวณ C ซึ่งเป็นส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์แทนด้วยความต้านทาน R_C มีค่าความต้านทานดังสมการที่ (3.18) ซึ่งปริมาตรบริเวณ D มีความต้านทานเท่ากับความต้านทาน R_C ด้วย

$$R_C = \frac{\rho_w(L - W_p)/2}{W_p h} = R_D \quad (3.18)$$

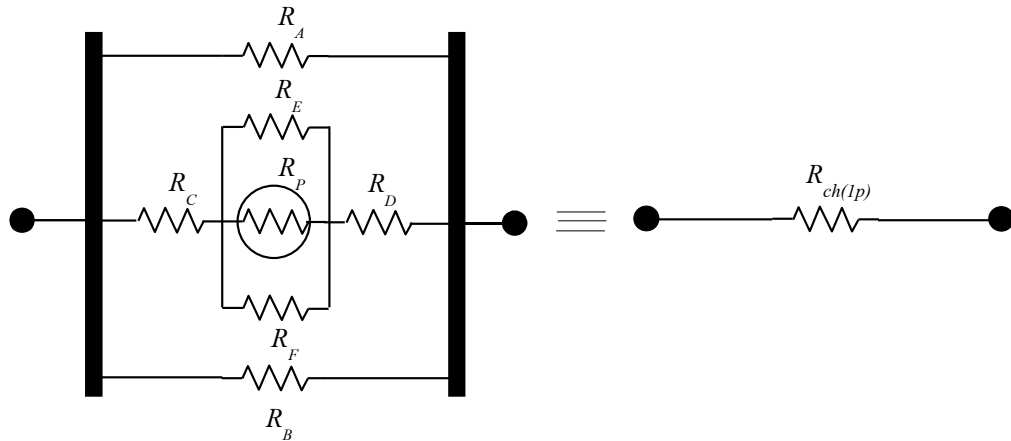
ปริมาตรบริเวณ E ซึ่งเป็นส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์แทนด้วยความต้านทาน R_E มีค่าความต้านทาน ดังสมการที่ (3.19) ซึ่งปริมาตรบริเวณ F มีความต้านทานเท่ากับความต้านทาน R_E ด้วย

$$R_E = \frac{\rho_w}{(h - W_p)/2} = R_F \quad (3.19)$$

และพื้นที่ปริมาตรบริเวณ p ซึ่งเป็นส่วนของอนุภาคเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์แทนด้วยความต้านทาน R_p มีค่าความต้านทานดังสมการที่ (3.20)

$$R_p = \frac{\rho_p(W_p)}{(W_p)^2} = \frac{\rho_p}{W_p} \quad (3.20)$$

จากรูปที่ 3.6 เมื่อพิจารณาปริมาตรทุกบริเวณ สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค ($n = 1$)

จากรูปวงจรสมมูลทางไฟฟ้ารูปที่ 3.7 สามารถหาค่าความต้านทานรวมทั้งหมดเป็น $R_{ch(1p)} = R_A \parallel R_B \parallel [R_C + R_D + R_E \parallel R_p \parallel R_F]$ ได้ดังสมการที่ (3.21)

$$R_{ch(1p)} = \frac{R_p(4R_A R_C + R_A R_E) + 2R_A R_C R_E}{2R_p(R_A + 4R_C + R_E) + R_E(R_A + 4R_C)} \quad (3.21)$$

จากสมการที่ (3.21) ทราบค่า $R_{ch(1p)}$ ได้จากการวัดผลการทดลองจริงและทราบค่า ρ_w ได้จากการวัดค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาคที่มีแต่สารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยที่ไม่มีอนุภาค ($R_{ch(0p)}$) แล้วทำการคำนวณย้อนกลับในสมการที่ (3.4) จากนั้นหาค่าความต้านทาน R_A ค่าความต้านทาน R_B ค่าความต้านทาน R_C ค่าความต้านทาน R_D ค่าความต้านทาน R_E และค่าความต้านทาน R_F ได้ แต่ยังไม่ทราบค่าความต้านทาน R_p เนื่องจากยังไม่ทราบค่า ρ_p จึงทำการหาค่าความต้านทาน R_p ได้จากสมการที่ (3.22)

$$R_p = \frac{R_A R_E (2R_C - R_{ch(1p)}) - 4R_C R_E R_{ch(1p)}}{2R_{ch(1p)}(R_A + 4R_C + R_E) - R_A(4R_C + R_E)} \quad (3.22)$$

ดังนั้นเมื่อทราบค่าความต้านทาน $R_{ch(1p)}$ จะทราบค่าความต้านทาน R_p ไปด้วย จากนั้นทำการแทนค่าความต้านทาน R_p ย้อนกลับในสมการที่ (3.20) จะได้ค่า ρ_p ของอนุภาค ซึ่งสามารถนำค่า ρ_p ไปใช้คำนวณกับระบบแบบใดก็ได้ ที่ใช้สารละลายความเข้มข้นเท่าเดิมแม้ขนาดของอนุภาคจะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อภายในช่องทางเดินจุลภาคมีอนุภาคกับภายในช่องทางเดินจุลภาคไม่มีอนุภาค ซึ่งแทนด้วย ΔR จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.23)

$$\Delta R = R_{ch(1p)} - R_{ch(0p)} \quad (3.23)$$

จากนั้นเข้าสู่กระบวนการหาผลต่างของแรงดันเมื่อมีอนุภาคกับไม่มีอนุภาคภายในช่องทางเดินจุลภาค เหมือนกับวิธีการหากรณีที่อยู่ในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค ตามวิธีการประมาณค่าความต้านทานช่องทางเดินจุลภาคด้วยสภาพต้านทานไฟฟ้ายังผลของแมกซ์เวลล์ เขียนแสดงความสัมพันธ์ ได้ดังสมการที่ (3.24)

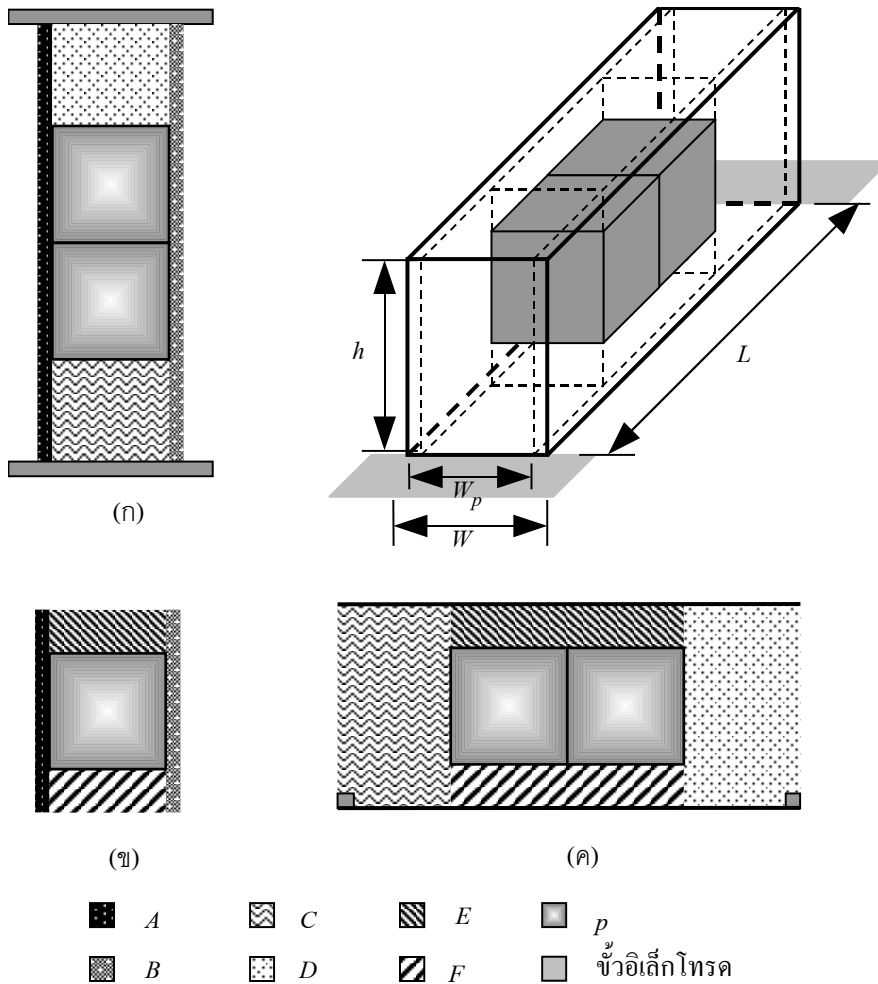
$$\Delta V = \frac{R_1 V_s}{R_1 + R_{ch(0p)}} - \frac{R_1 V_s}{R_1 + R_{ch(1p)}} \quad (3.24)$$

ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า วัดโดยใช้ LabVIEW เข้าสู่คอมพิวเตอร์ นำข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการนับจำนวนอนุภาคต่อไป

3.1.2.2 ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 2 อนุภาค ($n = 2$)

จากรูปที่ 3.8 ช่องทางเดินจุลภาคมีความกว้างแทนด้วย W มีความยาวแทนด้วย L ความสูงแทนด้วย h และสมมุติให้อนุภาคมีขนาดเท่าสี่เหลี่ยมลูกบาศก์อยู่ในช่องทางเดินจุลภาคมีความกว้างความยาวและความสูงเท่ากับ W_p รูป (ก) มองจากด้านบนของช่องทางเดินจุลภาค รูป (ข) มองจากด้านหน้าของช่องทางเดินจุลภาค และรูป (ค) มองจากด้านข้างของช่องทางเดินจุลภาค โดยทำการจำลองปริมาตรในแต่ละส่วน โดยทำการแบ่งช่องทางเดินออกเป็น ส่วน ๆ จากการทดลองซึ่งในแต่ละส่วนที่มีวัสดุเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือเป็นอนุภาคให้แทนด้วยความต้านทานของตัวเอง และประกอบกันขึ้นเป็นวงจรสมมูล ตัวต้านทานอนุกรมและขนานกัน เมื่อพิจารณารูปที่ 3.8 พบว่าปริมาตรบริเวณ A ซึ่งเป็นส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแทนด้วย ρ_w และแทนด้วยความต้านทานเป็น R_A มีค่าความต้านทานดังสมการที่ (3.17) ซึ่งปริมาตรบริเวณ B มีความต้านทานเท่ากับความต้านทาน R_A ด้วย และปริมาตรบริเวณ C เป็นส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์แทนด้วยความต้านทาน R_C มีค่าความต้านทานดังสมการที่ (3.25) โดยที่ปริมาตรบริเวณ D มีความต้านทานเท่ากับความต้านทาน R_C ด้วย

$$R_C = \frac{\rho_w(L - 2W_p)/2}{W_p h} = R_D \tag{3.25}$$



รูปที่ 3.8 ภายในช่องทางเดินจูลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์มี 2 อนุภาค ($n = 2$)

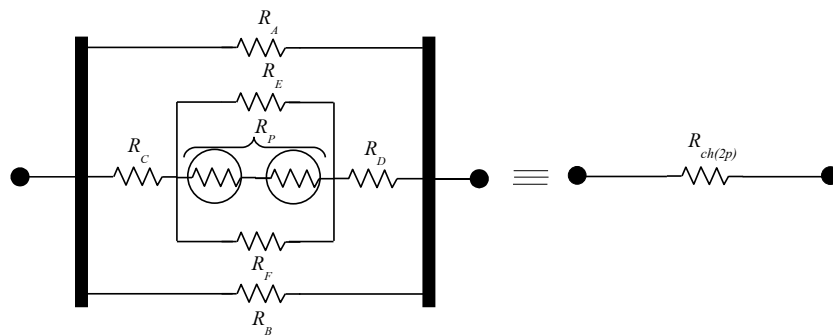
ปริมาตรบริเวณ E ซึ่งเป็นส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์แทนด้วยความต้านทาน R_E มีค่าความต้านทานดังสมการที่ (3.26) ซึ่งปริมาตรบริเวณ F มีความต้านทานเท่ากับ ความต้านทาน R_E ด้วย

$$R_E = \frac{2\rho_w}{(h - W_p)/2} = R_F \tag{3.26}$$

และปริมาตรบริเวณ p ซึ่งเป็นส่วนของอนุภาคเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์แทนด้วย ความต้านทาน R_p มีค่าความต้านทานดังสมการที่ (3.27)

$$R_p = \frac{\rho_p 2(W_p)}{(W_p)^2} = \frac{2\rho_p}{W_p} \quad (3.27)$$

จากรูปที่ 3.8 เมื่อพิจารณาปริมาตรทุกบริเวณ จะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแสดง ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของช่องทางเดินจุลภาคมี 2 อนุภาค ($n = 2$)

จากรูปวงจรสมมูลทางไฟฟ้ารูปที่ 3.9 สามารถหาค่าความต้านทานรวมทั้งหมด เป็น $R_{ch(2p)} = R_A \parallel R_B \parallel [R_C + R_D + R_E \parallel R_p \parallel R_F]$ ได้ดังสมการที่ (3.28)

$$R_{ch(2p)} = \frac{R_p(4R_A R_C + R_A R_E) + 2R_A R_C R_E}{2R_p(R_A + 4R_C + R_E) + R_E(R_A + 4R_C)} \quad (3.28)$$

จากสมการที่ (3.28) หาค่า $R_{ch(2p)}$ ได้จากการวัดผลการทดลองจริงและ หาค่า ρ_w ได้จากการวัดค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาคที่มีแต่สารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยที่ไม่มีอนุภาค ($R_{ch(0p)}$) แล้วทำการคำนวณย้อนกลับในสมการที่ (3.4) จากนั้นหาค่าความต้านทาน R_A ค่าความต้านทาน R_B ค่าความต้านทาน R_C ค่าความต้านทาน R_D ค่าความต้านทาน R_E และค่าความต้านทาน R_F ได้ แต่ยังไม่ทราบค่าความต้านทาน R_p เนื่องจากยังไม่ทราบค่า ρ_p จึงทำการหาค่าความต้านทาน R_p ได้จากสมการที่ (3.29)

$$R_p = \frac{R_A R_E (2R_C - R_{ch(2p)}) - 4R_C R_E R_{ch(2p)}}{2R_{ch(2p)}(R_A + 4R_C + R_E) - R_A(4R_C + R_E)} \quad (3.29)$$

ดังนั้นเมื่อทราบค่าความต้านทาน $R_{ch(2p)}$ จะทราบค่าความต้านทาน R_p ไปด้วย จากนั้นทำการแทนค่าความต้านทาน R_p ย้อนกลับในสมการที่ (3.23) จะได้ค่า ρ_p ของอนุภาค ซึ่งสามารถนำค่า ρ_p ไปใช้คำนวณกับระบบแบบใดก็ได้ ที่ใช้สารละลายความเข้มข้นเท่าเดิมแม้ขนาดของอนุภาคจะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อภายในช่องทางเดินจุลภาคมีอนุภาคกับภายในช่องทางเดินจุลภาคไม่มีอนุภาค ซึ่งแทนด้วย ΔR จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.30)

$$\Delta R = R_{ch(2p)} - R_{ch(0p)} \quad (3.30)$$

จากนั้นเข้าสู่กระบวนการหาผลต่างของแรงดันเมื่อมีอนุภาคกับไม่มีอนุภาคภายในช่องทางเดินจุลภาค เหมือนกับวิธีการหากรณีที่อยู่ในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค เขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3.31)

$$\Delta V = \frac{R_1 V_s}{R_1 + R_{ch(0p)}} - \frac{R_1 V_s}{R_1 + R_{ch(2p)}} \quad (3.31)$$

ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ทำการวัดโดยใช้ LabVIEW เข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ นำข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์เหมือนกรณีที่อยู่ในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค

3.1.2.3 ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 3 อนุภาค ($n = 3$)

จากรูปที่ 3.10 ช่องทางเดินจุลภาคมีความกว้างแทนด้วย W มีความยาวแทนด้วย L ความสูงแทนด้วย h และสมมุติให้อนุภาคมีขนาดเท่าสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่อยู่ในช่องทางเดินจุลภาคมีความกว้างความยาวและความสูงเท่ากับ W_p รูป (ก) มองจากด้านบนของช่องทางเดินจุลภาค รูป (ข) มองจากด้านหน้าของช่องทางเดินจุลภาค และรูป (ค) มองจากด้านข้างของช่องทางเดินจุลภาค ทำการจำลองปริมาตรในแต่ละส่วน โดยทำการแบ่งช่องทางเดินออกเป็น ส่วน ๆ จากการทดลอง ซึ่งในแต่ละส่วนที่มีวัสดุเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์หรือเป็นอนุภาค ให้แทนด้วยความต้านทานของตัวเอง และประกอบกันขึ้นเป็นวงจรสมมูล ตัวต้านทานอนุกรมและขนานกัน เมื่อพิจารณารูปที่ 3.10 พบว่าปริมาตรบริเวณ A ซึ่งเป็นส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแทนด้วย ρ_w และแทนด้วยความต้านทานเป็น R_A มีค่าความต้านทานดังสมการที่ (3.17) ซึ่งปริมาตรบริเวณ B มีความต้านทานเท่ากับความต้านทาน R_A ด้วย และปริมาตรบริเวณ C เป็นส่วนของสารละลาย

อิเล็กทรอนิกส์แทนด้วยความต้านทาน R_C มีค่าความต้านทานแสดงดังสมการที่ (3.32) โดยที่ปริมาตรบริเวณ D มีความต้านทานเท่ากับความต้านทาน R_C ด้วย

$$R_C = \frac{\rho_w(L - 3W_p)/2}{W_p h} = R_D \quad (3.32)$$

โดยปริมาตรบริเวณ E ซึ่งเป็นส่วนของสารละลายอิเล็กทรอนิกส์แทนด้วยความต้านทาน R_E มีค่าความต้านทานดังสมการที่ (3.33) ซึ่งปริมาตรบริเวณ F มีความต้านทานเท่ากับความต้านทาน R_E ด้วย

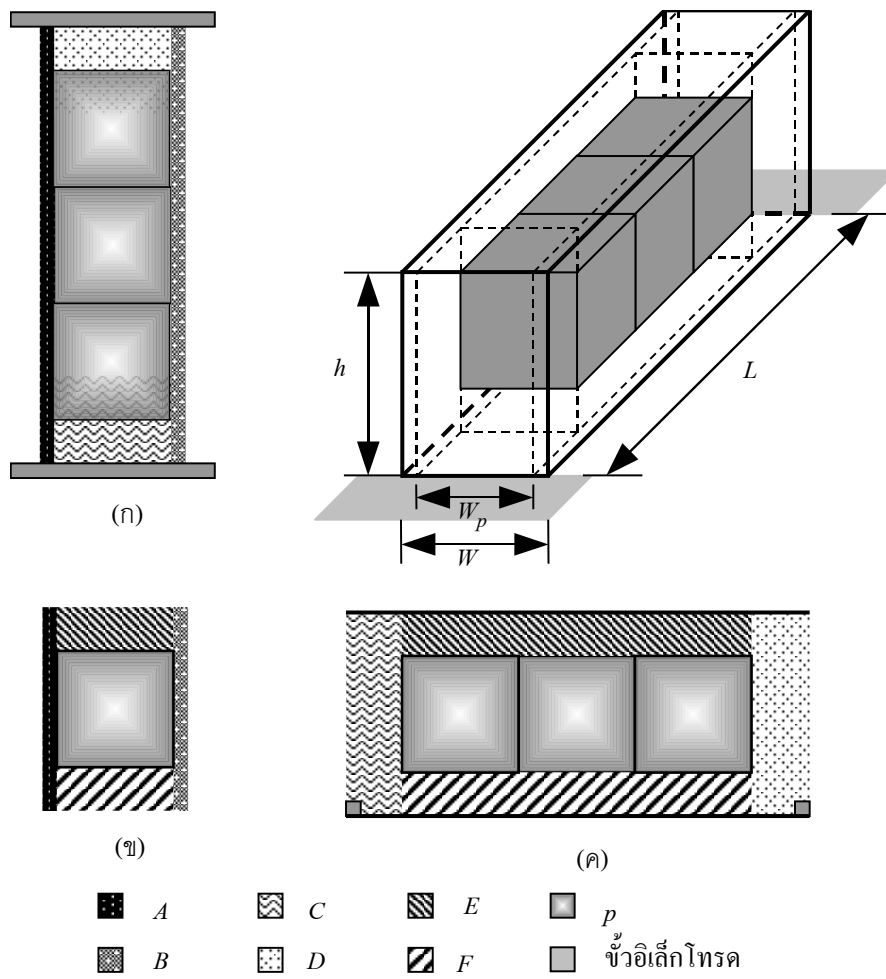
$$R_E = \frac{3\rho_w}{(h - W_p)/2} = R_F \quad (3.33)$$

และปริมาตรบริเวณ p ซึ่งเป็นส่วนของอนุภาคเป็นสื่อเหลี่ยมลูกบาศก์แทนด้วยความต้านทาน R_p มีค่าความต้านทานดังสมการที่ (3.34)

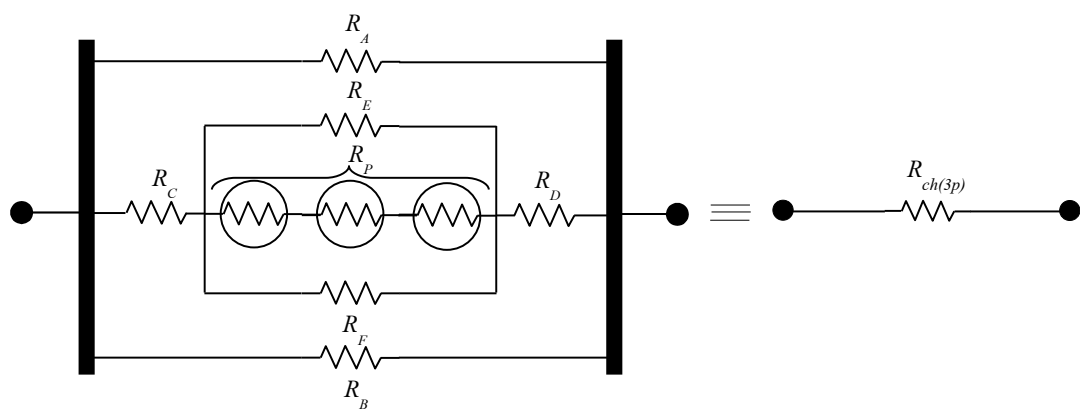
$$R_p = \frac{\rho_p 3(W_p)}{(W_p)^2} = \frac{3\rho_p}{W_p} \quad (3.34)$$

จากรูปที่ 3.10 เมื่อพิจารณาปริมาตรทุกบริเวณ สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.11 แล้วทำการพิจารณาค่าความต้านทานรวมของทั้งหมดเป็น $R_{ch(3p)}$ โดยที่ $R_{ch(3p)} = R_A \parallel R_B \parallel [R_C + R_D + R_E \parallel R - p \parallel R_F]$ ได้ดังสมการที่ (3.35)

$$R_{ch(3p)} = \frac{R_p(4R_A R_C + R_A R_E) + 2R_A R_C R_E}{2R_p(R_A + 4R_C + R_E) + R_E(R_A + 4R_C)} \quad (3.35)$$



รูปที่ 3.10 อนุภาคจำนวน 3 อนุภาคอยู่ในช่องทางเดินจูลภาค



รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของช่องทางเดินจูลภาคมี 3 อนุภาค ($n = 3$)

จากสมการที่ (3.35) ทราบค่า $R_{ch(3p)}$ ได้จากการ วัดผลการ ทดลองจริงและทราบค่า ρ_w ได้จากการวัดค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาคที่มีแต่สารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยที่ไม่มีอนุภาค ($R_{ch(0p)}$) แล้วทำการคำนวณย้อนกลับในสมการที่ (3.4) จากนั้นหาค่าความต้านทาน R_A ค่าความต้านทาน R_B ค่าความต้านทาน R_C ค่าความต้านทาน R_D ค่าความต้านทาน R_E และค่าความต้านทาน R_F ได้ แต่ยังไม่ทราบค่าความต้านทาน R_p เนื่องจากยังไม่ทราบค่า ρ_p จึงทำการหาค่าความต้านทาน R_p ได้จากสมการที่ (3.34)

$$R_p = \frac{R_A R_E (2R_C - R_{ch(3p)}) - 4R_C R_E R_{ch(3p)}}{2R_{ch(3p)}(R_A + 4R_C + R_E) - R_A(4R_C + R_E)} \quad (3.36)$$

ดังนั้นเมื่อทราบค่าความต้านทาน $R_{ch(3p)}$ จะทราบค่าความต้านทาน R_p ไปด้วย จากนั้นทำการแทนค่าความต้านทาน R_p ย้อนกลับในสมการที่ (3.34) จะได้ค่า ρ_p ของอนุภาค ซึ่งสามารถนำค่า ρ_p ไปใช้คำนวณกับระบบแบบใดก็ได้ที่ใช้สารละลายความเข้มข้นเท่าเดิมแม้ขนาดของอนุภาคจะเปลี่ยนไป ดังนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อภายในช่องทางเดินจุลภาคมีอนุภาคกับภายในช่องทางเดินจุลภาคไม่มีอนุภาค ซึ่งแทนด้วย ΔR จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.37)

$$\Delta R = R_{ch(3p)} - R_{ch(0p)} \quad (3.37)$$

จากนั้นเข้าสู่กระบวนการหาผลต่างของแรงดันเมื่อมีอนุภาคกับไม่มีอนุภาคภายในช่องทางเดินจุลภาค เหมือนกับวิธีการหาครณีที่ภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค เขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3.38)

$$\Delta V = \frac{R_1 V_s}{R_1 + R_{ch(0p)}} - \frac{R_1 V_s}{R_1 + R_{ch(3p)}} \quad (3.38)$$

ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า วัดโดยใช้ LabVIEW เข้าสู่คอมพิวเตอร์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกไปทำการวิเคราะห์เหมือนกรณีที่อยู่ในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค จากการหาค่า ρ_p ของทั้ง 3 กรณีเพื่อที่จะทำการหาค่า ρ_p เฉลี่ย ไปใช้ในการคำนวณจริง เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานทั้งหมดของช่องทางเดินจุลภาคตอนที่มีอนุภาคบรรจุอยู่ภายใน จากวิธีการหาค่าความต้านทานโดยใช้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับจำนวน 1, 2 และ 3 อนุภาคตามที่กล่าวมา คาดว่าน่าจะให้ค่าความต้านทานของช่องทางเดินกระแสใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่ากรณีของ

แมกซ์เวลล์ เนื่องจากอนุภาคที่ใช้ในการทดสอบและช่องทางเดินจุลภาคที่จะพัฒนาขึ้นในบทที่ 4 มีขนาดใกล้เคียงกัน ดังนั้นน่าจะเกิดความผิดพลาดจากการใช้ทฤษฎีของแมกซ์เวลล์มากกว่าวิธีนี้ แต่อย่างไรก็ตาม อนุภาคที่ใช้ในวิธีนี้ได้ทำการประมาณให้เป็นที่เหลื่อมลูกบาศก์ซึ่งตามความเป็นจริงเป็นทรงกลม น่าจะยังมีความผิดพลาดหลงเหลืออยู่

บทที่ 4

กระบวนการพัฒนาช่องทางเดินจุลภาค

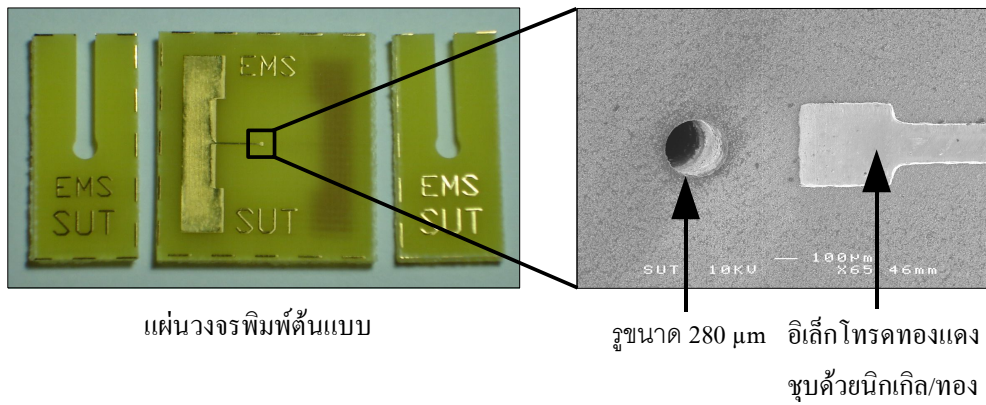
ในบทนี้จะนำเสนอการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ เพื่อใช้ในการนับจำนวนอนุภาคซึ่งแขวนลอยในสารละลายด้วยเทคโนโลยีการสร้างแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Boards : PCB) และเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical System : MEMS) ซึ่งการสร้างด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค แบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการสร้างช่องทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจกเพื่อใช้ในการตรวจรู้สัญญาณ ส่วนที่สองเป็นการสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบช่องทางเดินจุลภาคด้วยกระบวนการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า โดยใช้สารไวแสงโฟโตรีซิสชนิดลบ SU-8 เป็นแม่พิมพ์ขึ้นรูปโครงสร้าง และส่วนสุดท้าย คือ การผลิตช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน (polydimethylsiloxane : PDMS) และการสร้างตัวตรวจรู้เพื่อให้ของเหลวและอนุภาคไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาคได้

4.1 เทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB)

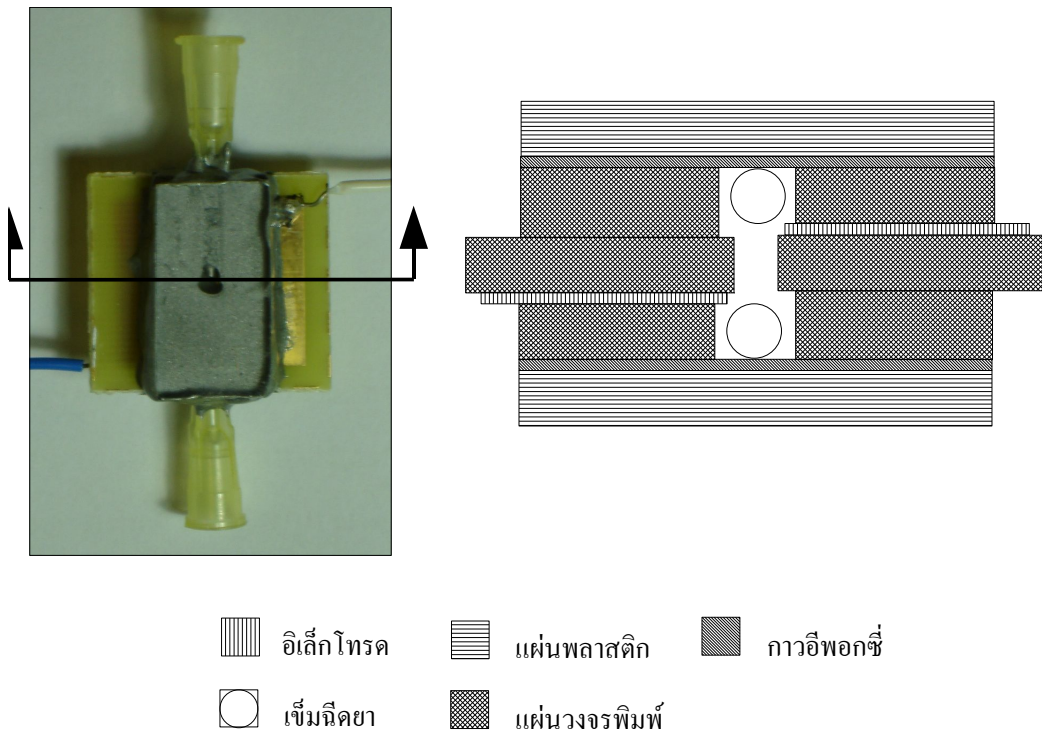
การสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ เนื่องจากว่าในปัจจุบันแผ่นวงจรพิมพ์เป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาด และใช้กันอย่างแพร่หลายพร้อมทั้งมีราคาถูกด้วย ได้ทำการออกแบบตัวตรวจรู้ และส่งไปสร้างด้วยกระบวนการเชิงพาณิชย์ เพื่อที่จะไม่ต้องลงมือทำเองเป็นการประหยัดเวลา ในวิทยานิพนธ์นี้จะสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์ 2 แบบ โดยแบบแรกทำการออกแบบเองและได้ส่งไปสร้างที่บริษัทผลิตแผ่นวงจรพิมพ์เชิงพาณิชย์ ส่วนแบบที่สองเป็นการออกแบบและสร้างเองโดยใช้ฟิล์มแห้งในห้องปฏิบัติการ

4.1.1 การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์

ได้ทำการออกแบบลวดลายของตัวตรวจรู้ และส่งไปสร้างที่บริษัทผลิตแผ่นวงจรพิมพ์เชิงพาณิชย์ ได้ตัวตรวจรู้กลับมา ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ตัวตรวจรู้มีขั้วอิเล็กโทรดชุบด้วยทอง วางห่างจากรู 300 μm และมีความกว้าง 350 μm รูที่เจาะมีขนาด 280 μm มาทำการประกอบชิ้นส่วนโดยใช้แผ่นพลาสติกกับเข็มฉีดยา ในการประกอบเป็นตัวตรวจรู้ให้สมบูรณ์ ซึ่งใช้กาวที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน คือ กาวอีพอกซี เป็นตัวเชื่อมต่อ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้น มีช่องทางเดินใหญ่เกินไปที่จะตรวจจับอนุภาคได้ จึงทำการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้เอง โดยใช้ฟิล์มแห้งดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.1 ตัวตรวจรู้ที่สร้างโดยบริษัทผลิตแผ่นวงจรพิมพ์เชิงพาณิชย์



รูปที่ 4.2 โครงสร้างตัวตรวจรู้ที่ประกอบเสร็จแล้ว

4.1.2 การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้ฟิล์มแห้ง

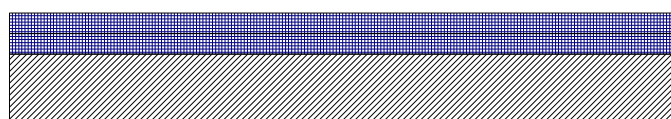
ฟิล์มแห้งเป็นฟิล์มที่ใช้ในอุตสาหกรรมแผ่นวงจรพิมพ์ นำไปใช้เป็นวัสดุในการสร้างช่องทางเดินจุลภาคเพื่อสร้างตัวตรวจรู้ จึงได้ทำการออกแบบและสร้างช่องทางเดินจุลภาค โดยใช้ฟิล์มแห้งบนแผ่นกระจก กระบวนการสร้างแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

4.1.2.1 การสร้างช่องทางเดินจุลภาค

ในการสร้างช่องทางเดินจุลภาคใช้กระจกขนาด 1 นิ้ว x 3 นิ้ว เป็นฐานทำความสะอาดและเป่าให้แห้ง ใช้ฟิล์มแห้งแบบลบหนาประมาณ $25\ \mu\text{m}$ สามารถเพิ่มความหนาได้โดยการเพิ่มชั้นเข้าไปตามที่ต้องการ จากนั้นฉายแสง UV ผ่านโฟโตมาสก์ (photomask) เพื่อทำช่องทางเดินจุลภาค หลังจากฉายแสง ทำการลอกสารไวแสงที่ไม่ถูกฉายออกด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (NaCO_3) เพื่อให้เกิดช่องทางเดินจุลภาค รูปที่ 4.3 แสดงขั้นตอนการสร้างช่องทางเดินจุลภาคบนแผ่นกระจก โดย (ก) แผ่นกระจก (ข) ทำการเคลือบฟิล์มแห้ง 2 ชั้นเพื่อให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ (ค) ได้ช่องทางเดินจุลภาคตามที่ต้องการไว้ รูปแบบของช่องทางเดินจุลภาคที่สร้างขึ้นแสดงในรูปที่ 4.4 โดยช่องทางเดินจุลภาค มีความกว้างประมาณ $100\ \mu\text{m}$ และมีความสูงประมาณ $80\ \mu\text{m}$ ฟิล์มแห้งหนา $25\ \mu\text{m}$ ดังนั้นความหนาของกาวของฟิล์มแห้งคือ $15\ \mu\text{m}$



(ก)



(ข)



(ค)

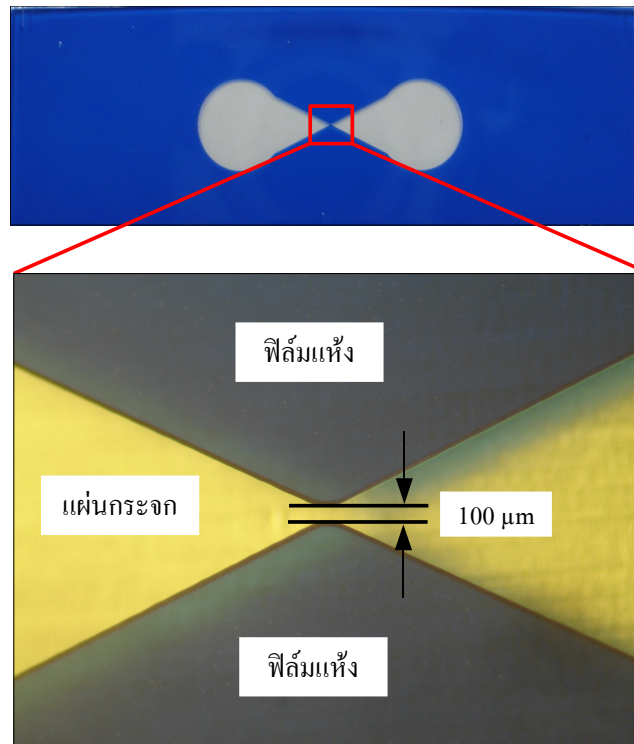


แผ่นกระจก



ฟิล์มแห้ง

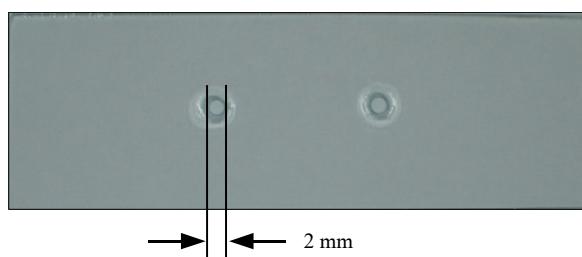
รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการสร้างช่องทางเดินจุลภาค



รูปที่ 4.4 ช่องทางเดินจุลภาคที่สร้างด้วยฟิล์มแห้ง

4.1.2.2 การสร้างช่องทางเข้า-ออกของของเหลว

ช่องทางเดินจุลภาคจะสมบูรณ์ได้ ต้องมีกระจกอีกแผ่นเพื่อใช้ปกคลุมส่วนบน ซึ่งแผ่นปกคลุมต้องมีช่องทางเข้า-ออกที่ของเหลว สามารถไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาคได้ ช่องทางเข้า-ออกของของเหลว ทำโดยการกัดแผ่นกระจกขนาด 1 นิ้ว x 3 นิ้ว ให้ทะลุโดยใช้กรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น 48% รายละเอียดของกระบวนการสร้าง แสดงในภาคผนวก ก ซึ่งสามารถเจาะรูกระจกได้ แสดงในรูปที่ 4.5

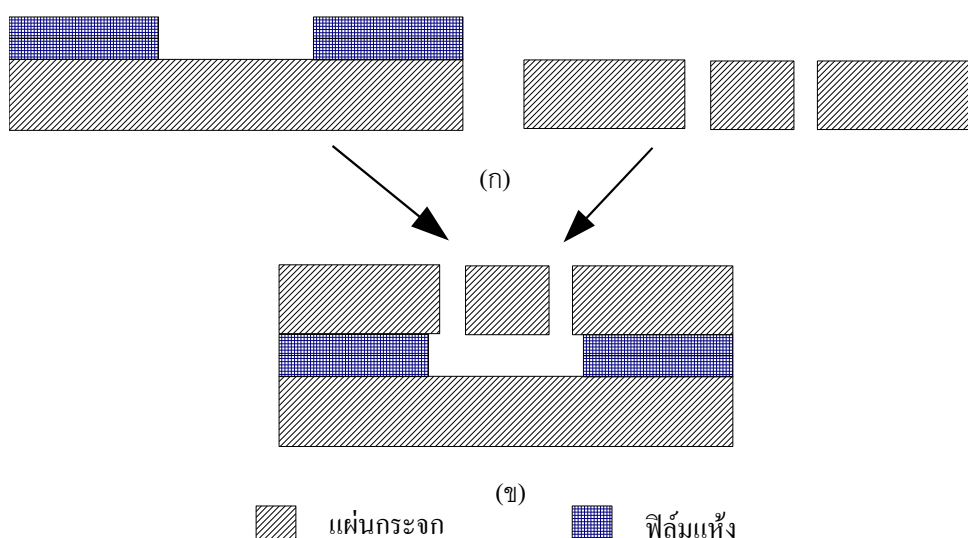


รูปที่ 4.5 แผ่นกระจกที่เจาะรูด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น 48%

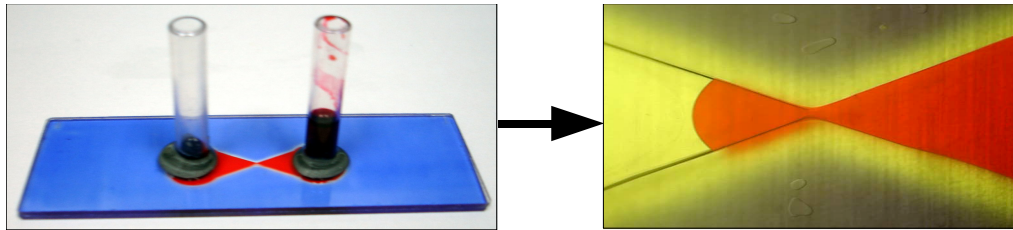
บางครั้งรูกระจกที่ได้ไม่เท่ากันและมีขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการ เนื่องจากการกัดเซาะของสารเคมีด้านข้าง ระยะเวลาในกระบวนการเจาะรูกระจกใช้เวลาประมาณ 1 วัน รวมทั้งอันตรายจากสารเคมีที่ใช้ด้วย

4.1.2.3 การบอนด์ช่องทางเดินจุดภาคกับแผ่นปกคลุม

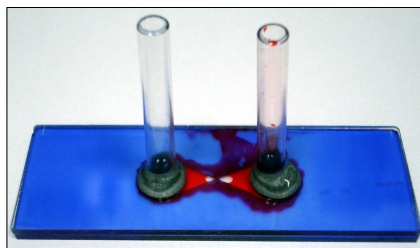
ทำการบอนด์แผ่นกระจกที่มีรูกับแผ่นกระจกที่มีฟิล์มแข็ง เพื่อทำเป็นช่องทางเดินจุดภาคที่สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) แผ่นกระจกที่มีฟิล์มแข็งกับแผ่นกระจกที่มีรู (ข) บอนด์ทั้งสองแผ่นเข้าด้วยกัน โดยการจุ่มใน Isopropyl Alcohol (IPA) เป็นน้ำยาเชื่อม โดยใช้มือกดระหว่างแผ่นกระจกที่มีรูกับแผ่นกระจกที่มีฟิล์มแข็งเข้าด้วยกัน และนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 70°C , 80°C , 90°C และ 100°C ที่เวลา 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที ทำที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการบอนด์ ขณะที่อบในเตาอบมีน้ำหนักขนาด 2.5 kg ทับบิ้นงานและปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องอย่างช้า ๆ ช่องทางเดินจุดภาคจะเสร็จสมบูรณ์ได้ต้องทดสอบการรั่วไหลของของเหลว ถ้าการบอนด์ดีก็จะสามารถกักเก็บของเหลวภายในช่องได้ จากการทดสอบการไหลของของเหลว ซึ่งมีท่อพลาสติกติดอยู่ที่ทางเข้า-ออกของรู ปริมาตรของน้ำหมึกสีแดงที่เต็มลงไปตามหนึ่งของท่อ จากนั้นน้ำหมึกสีแดงจะไหลผ่านช่องทางเดินจุดภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เป็นตัวอย่างการบอนด์ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 60 นาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสม น้ำหมึกสีแดงไม่สามารถซึมออกได้ ถ้าเวลาในการบอนด์สั้นหรือยาวกว่านี้ ทำให้น้ำหมึกสีแดงซึมออกจากช่องทางเดินจุดภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.8



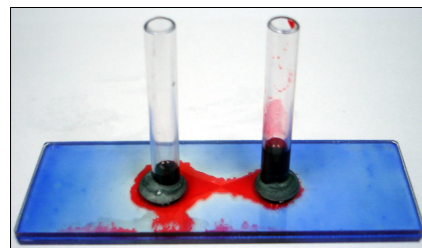
รูปที่ 4.6 ขั้นตอนการบอนด์ช่องทางเดินจุดภาคกับแผ่นปกคลุม



รูปที่ 4.7 บอนด์ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 60 นาที น้ำหมึกสีแดงไม่สามารถซึมออกได้



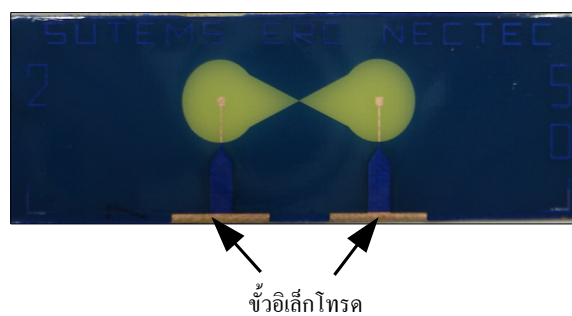
บอนด์ที่อุณหภูมิ 70°C นาน 30 นาที



บอนด์ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 120 นาที

รูปที่ 4.8 น้ำหมึกสีแดงสามารถซึมออกจากช่องทางเดินจุลภาคได้

เนื่องจากการสร้างช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ฟิล์มแห้งไม่มีขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ในการตรวจสอบสัญญาณ ในการนับจำนวนอนุภาคที่แขวนลอยในสารละลาย จึงได้เปลี่ยนโครงสร้างจากการเคลือบฟิล์มแห้งบนแผ่นกระจกมาเป็นเคลือบบนแผ่นวงจรพิมพ์ เพื่อทำเป็นตัวเซนเซอร์ ซึ่งมีทองแดงหนาประมาณ $17.5 \mu\text{m}$ เป็นขนาดบางที่สุด และทำลวดลายที่ต้องการบนแผ่นทองแดง จากนั้นเคลือบด้วยฟิล์มแห้งที่มีความหนา $25 \mu\text{m}$ ทำ 2 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ช่องทางเดินจุลภาคบนแผ่นวงจรพิมพ์

ตัวตรวจรู้จะสมบูรณ์ต้องนำช่องทางเดินจุลภาคไปบอนด์กับแผ่นกระจกที่เจาะรู และทดสอบการรั่วซึมของของเหลวโดยใช้น้ำหมึกสีแดง โดยทำการบอนด์ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 60 นาที เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมตอนต้น ผลปรากฏว่าน้ำหมึกสีแดงสามารถซึมออกด้านข้างได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และที่เงื่อนไขอื่น ๆ น้ำหมึกสีแดงสามารถซึมออกได้ อาจเนื่องมาจากการที่มีลวดลายอิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นวงจรพิมพ์ ทำให้แผ่นไม่เรียบมีความต่างระดับของแผ่นเกิดขึ้น จึงไม่สามารถบอนด์ได้สนิท



รูปที่ 4.10 บอนด์ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 60 นาที น้ำหมึกสีแดงสามารถซึมออกด้านข้างได้

4.1.3 สรุป

จากการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีแผ่น วงจรพิมพ์ ที่ส่งไปสร้างที่ บริษัทผลิตแผ่นวงจรพิมพ์เชิงพาณิชย์ สามารถสร้างโครงสร้างตัวตรวจรู้ได้ แต่ยังไม่สามารถนับจำนวนอนุภาคได้ อาจเนื่องมาจากเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและช่องทางเดินจุลภาคมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคมาก จึงทำการเปลี่ยน โครงสร้างตัวตรวจรู้และวัสดุที่ใช้ด้วยเทคโนโลยีแผ่น วงจรพิมพ์โดยใช้ฟิล์มแห้งทำช่องทางเดินจุลภาค ได้ช่องทางเดินจุลภาคบนแผ่นกระจกและทดสอบการรั่วไหลของของเหลว เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการบอนด์ คือ บอนด์ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 60 นาที เมื่อทดสอบการไหลผ่านของของเหลว ของเหลวไม่สามารถซึมออกด้านข้างได้ และเปลี่ยนจากแผ่นกระจกเป็นแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีลวดลายอิเล็กทรอนิกส์ และทำการบอนด์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ ของเหลวสามารถรั่วออกจากช่องทางเดินจุลภาคได้ทุกเงื่อนไข จึงได้พัฒนารูปแบบและวัสดุที่ใช้ในการสร้างช่องทางเดินจุลภาคของตัวตรวจรู้ขึ้น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

4.2 เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS)

ออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรมีฟิล์มด้วยฟิล์มแข็งบนแผ่นวงจรมีฟิล์มที่มีความหนาของขั้วอิเล็กโทรดที่ไม่เรียบ เมื่อทำการบอนด์ระหว่างแผ่นวงจรมีฟิล์มแข็งกับแผ่นกระจกที่เจาะรู แล้วทำการทดสอบผลการบอนด์ มีของเหลวสามารถซึมออกได้ จึงได้ทำการปรับปรุงกระบวนการสร้าง โดยการนำเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคมาใช้ เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการสร้างและลดขนาดของชิ้นงานลงในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกราฟต์และแผ่นกระจก ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

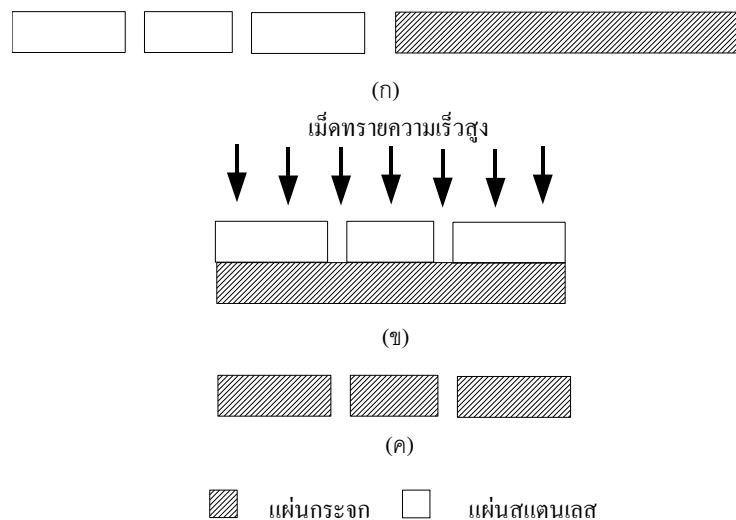
4.2.1 การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกราฟต์

กระบวนการ ออกแบบและ สร้างตัวตรวจรู้ด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกราฟต์ ได้แบ่งการสร้างออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการสร้างช่องทางผ่านเข้า-ออกของของเหลวและมีขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจกเพื่อใช้ในการตรวจรู้สัญญาณ ส่วนที่สองเป็นการสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบช่องทางเดินจุลภาคด้วยกระบวนการชุบนิกเกิลโดยใช้ไฟฟ้าบนแผ่นกราฟต์ ใช้สารไวแสงโฟโตเรซิสชนิดลบ SU-8 เป็นแม่พิมพ์ขึ้นรูปโครงสร้างแบบ และส่วนสุดท้าย คือ การผลิตช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS และการ สร้างตัวตรวจรู้เพื่อให้ของเหลวและอนุภาคไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาคได้

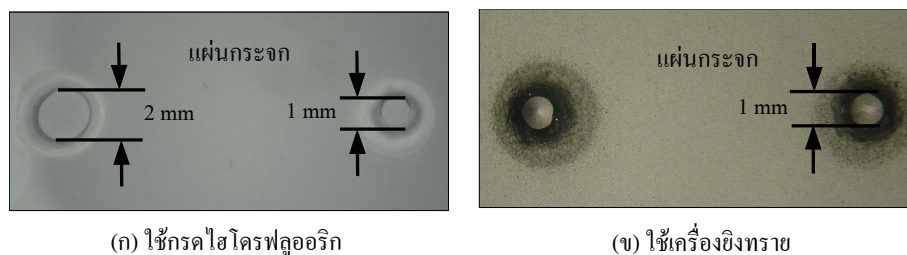
4.2.1.1 การสร้างช่องทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก

ช่องทางเข้า-ออกของของเหลวกับขั้วอิเล็กโทรดจะถูกสร้างขึ้นบนแผ่นกระจก โดยทางเข้า-ออกมีไว้เพื่อให้ของเหลว และอนุภาคไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาค และมีขั้วอิเล็กโทรดเพื่อทำหน้าที่ในการ ตรวจรู้สัญญาณ กระบวนการ สร้างช่องทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรดโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเริ่มจากการ สร้างช่องทางเข้า-ออกของของเหลว รายละเอียดของ กระบวนการ สร้าง อยู่ในภาคผนวก ก โดยเจาะรูกระจกด้วย กรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น 48% ซึ่งสามารถเจาะรูกระจกได้ แต่รูกระจกที่ได้มีขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการและขนาดของรูที่ได้ไม่เท่ากัน เนื่องจากสารเคมีสามารถกัดเซาะเข้าด้านข้างได้ ระยะเวลาในกระบวนการเจาะรูกระจกใช้เวลาประมาณ 1 วัน รวมทั้งอันตรายจากสารเคมีที่ใช้ จึงเปลี่ยนวิธีใหม่โดยใช้การยิงทรายในการเจาะรูกระจกแทนการยิงทราย คือ การพ่นลมที่มีความเร็วสูงให้ทรายวิ่งมาเพื่อไปสกัดชิ้นงานหลุดออกนิยมใช้ในการ ตกแต่งผิวหน้าของ ชิ้นงานทางเครื่องกล โดยกระบวนการเจาะ แสดงดังรูปที่ 4.11 (ก) เริ่มจากเตรียมแผ่นสแตนเลสเพื่อทำเป็นแบบ ทำการเจาะรูแผ่นสแตนเลสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ห่างกัน 1 เซนติเมตร จำนวน 2 รู ตามที่ได้ออกแบบไว้ และแผ่นกระจกที่เตรียมไว้

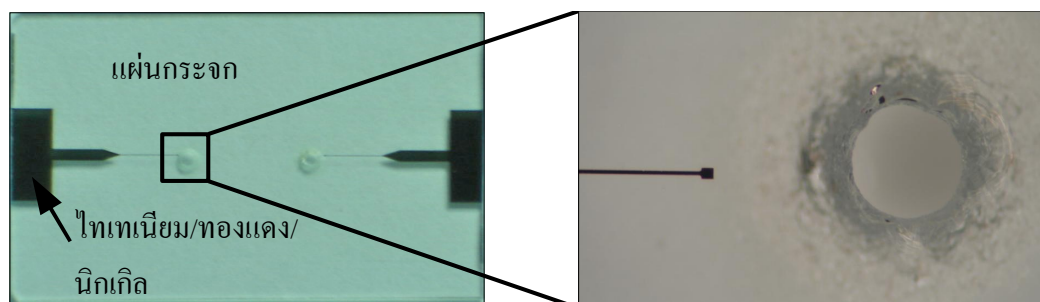
(ข) นำแผ่นกระจกประกบเข้ากับแผ่นสแตนเลส แล้วทำการยิงทรายไปยังแผ่นสแตนเลส กระจกตรงส่วนที่ถูกพุ่งชนด้วยเม็ดทรายจะทะลุเป็นรูตามที่ต้องการ (ค) รูที่เกิดจากการยิงทราย ซึ่งการเจาะกระจกด้วยวิธีนี้ แต่ละชั้นใช้เวลา 5 นาที ควบคุมขนาดของรูที่เจาะได้ดีกว่าวิธีแรก และลดขั้นตอนในการทำงานได้มาก รูปที่ 4.12 (ก) ทางเข้า-ออกของของเหลวที่สร้างด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก เข้มข้น 48% (ข) ทางเข้า-ออกของของเหลวที่สร้างด้วยกระบวนการเจาะรูกระจกด้วยการยิงทราย สำหรับส่วนที่ 2 คือ การสร้างขั้วอิเล็กโทรดเพื่อใช้ในการตรวจรู้สัญญาณ ลำดับกระบวนการสร้างขั้วอิเล็กโทรดแสดงอยู่ในภาคผนวก ข ซึ่งขั้วอิเล็กโทรดทำด้วยฟิล์มโลหะ 3 ชั้น ได้แก่ ไทเทเนียมหนาประมาณ 500 อังสตรอม ทองแดงหนาประมาณ 1,500 อังสตรอม และ นิกเกิลหนาประมาณ 500 อังสตรอม ขั้วอิเล็กโทรดที่สร้างขึ้น ในการ ตรวจรู้ สัญญาณ มีขนาด ความ กว้าง $30\ \mu\text{m}$ คือ ส่วนที่ยื่นออกมาและตรงปลายเป็นส่วนที่อยู่ใกล้ช่องทางเข้า-ออกของของเหลวมากที่สุด มีขนาด $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.11 ขั้นตอนการยิงทราย



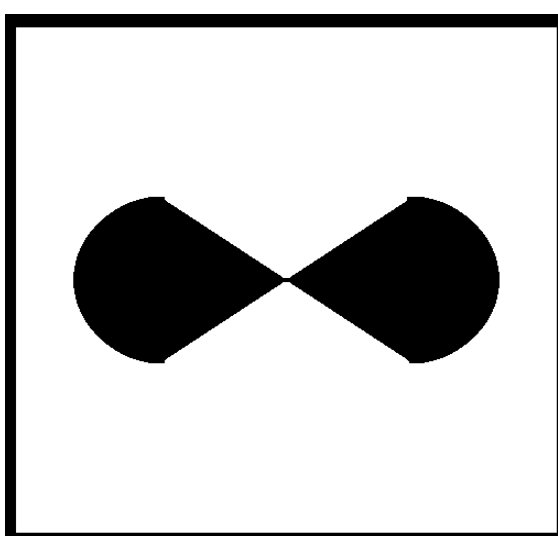
รูปที่ 4.12 ทางเข้า-ออกของของเหลวบนแผ่นกระจก



รูปที่ 4.13 ขั้วอิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นกระจก

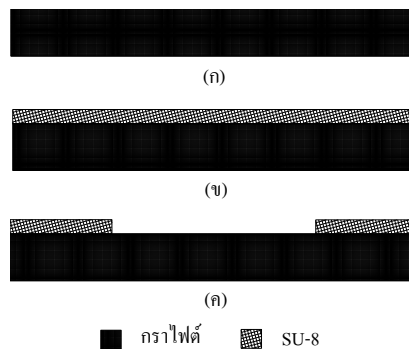
4.2.1.2 การสร้างแม่พิมพ์ของช่องทางเดินจุลภาค

สร้างแม่พิมพ์ของช่องทางเดินจุลภาคด้วยนิกเกิลบนแผ่นฐานรองกราฟไฟต์ เพื่อต้องการชิ้นงานที่เหมือนเดิมจำนวนมาก ๆ โดยใช้แม่พิมพ์เดิม กระบวนการสร้างเริ่มจาก การออกแบบลวดลายแม่พิมพ์ของช่องทางเดินจุลภาค ด้วยซอฟต์แวร์เครื่องมือการออกแบบวงจรรวม อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ ใช้โปรแกรมวาดลวดลาย LASI ในการออกแบบ แล้วทำการ บันทึกภาพลวดลายในรูปแบบไฟล์โพสคริป ที่สามารถลือตลงบนฟิล์ม ให้เป็นลวดลายด้วยเครื่อง กระบวนการเตรียมต้นฉบับสิ่งพิมพ์มาตรฐาน สามารถสร้างภาพลวดลายได้เล็กที่สุดประมาณ $30\ \mu\text{m}$ ซึ่งมีความละเอียดของภาพ 3,600 dpi ลวดลายที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในงานต่อไป ลวดลายที่ออกแบบ ด้วยโปรแกรมวาดลวดลาย LASI แม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาค แสดงดังรูปที่ 4.14

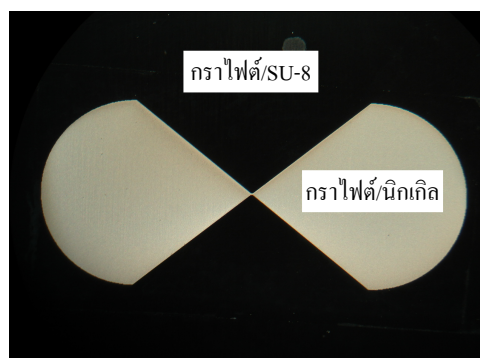


รูปที่ 4.14 แบบแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคที่ออกแบบด้วยโปรแกรมวาดลวดลาย LASI

ลำดับกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคด้วยการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าบนแผ่นกราฟไฟต์ แสดงดังรูปที่ 4.15 เริ่มจาก เตรียมแผ่นกราฟไฟต์ขนาด 1 นิ้ว x 1.25 นิ้ว หนา ประมาณ 1.5 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.15 (ก) จากนั้น หมุนเคลือบสารไวแสงโฟโตรีซิสชนิดลบ SU-8 100 ด้วยความเร็วการหมุน 500 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 วินาที แล้วต่อด้วย 3,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที และนำไปอบให้แห้ง (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 4.15 (ข) นำมาฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ และอบเน้นลวดลาย (post-exposure bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการล้างฟิล์ม (development) จะได้แม่พิมพ์ขึ้นรูปโครงสร้าง SU-8 ที่มีหลุมเป็นรูปช่องทางเดินจุลภาคอยู่บนแผ่นกราฟไฟต์ แสดงดังรูปที่ 4.15 (ค) เมื่อได้แม่พิมพ์ขึ้นรูปโครงสร้าง SU-8 แล้ว เติมโลหะนิกเกิลลงในช่องทางเดินจุลภาคโดยการชุบด้วยไฟฟ้า โดยใช้ความหนาแน่นกระแส 5 mA/cm² จนมวลนิกเกิลล้นจากแม่พิมพ์ขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ในระหว่างกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจะใช้เทปกาวปิดด้านล่างของแผ่นกราฟไฟต์ ทั้งหมดเพื่อลดพื้นที่การเคลือบนิกเกิล

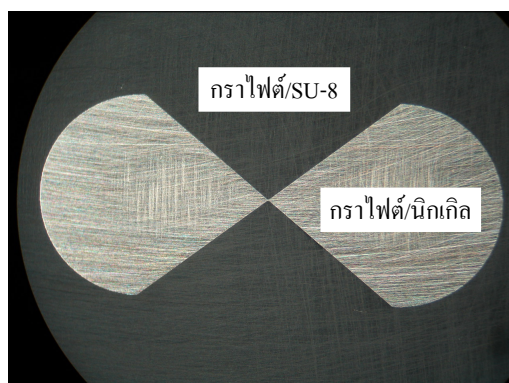


รูปที่ 4.15 กระบวนการสร้างแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคด้วยสารไวแสงโฟโตรีซิสชนิดลบ SU-8

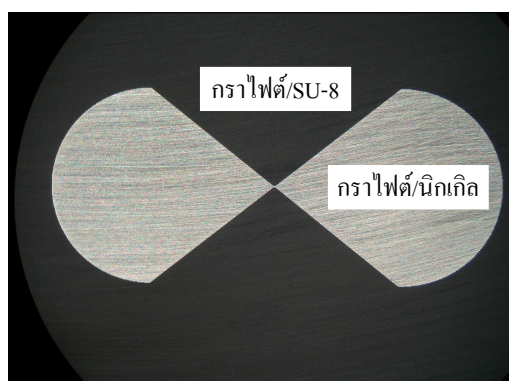


รูปที่ 4.16 ภาพมวลนิกเกิลล้นจากแม่พิมพ์โครงสร้าง SU-8

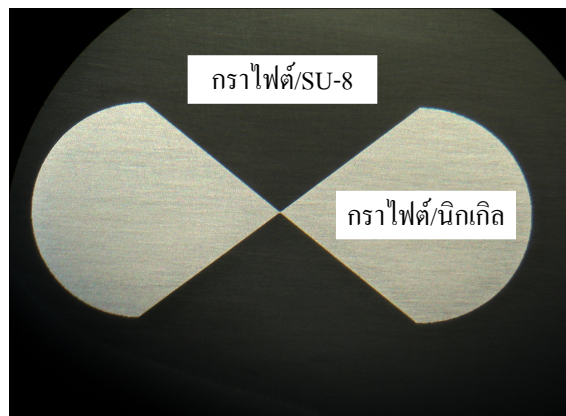
ขั้นตอนต่อไปเป็นการขัดผิว นิกเกิล ให้เรียบ โดยเริ่มจากการขัดผิว นิกเกิล ให้เสมอ กับผิว SU-8 ก่อน ด้วยกระดาษทรายซิลิคอน คาร์ไบด์เบอร์ 500 ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 4.17 จากนั้นเปลี่ยนเป็นขัดด้วยกระดาษทรายซิลิคอน คาร์ไบด์เบอร์ 1,200 เพื่อให้ผิว นิกเกิลเสมอ กับผิว SU-8 มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และขัดผิว นิกเกิลด้วยผ้าขัดมัน DP Nap กับผงขัดอะลูมินาขนาด $1\ \mu\text{m}$ และ $0.3\ \mu\text{m}$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 นำชิ้นงานที่ได้ไปต้มในน้ำยาที่สามารถละลายพันธะของ SU-8 ได้ คือ remover PG เมื่อ SU-8 หลุดออกจากแผ่นกราฟต์ทั้งหมดแล้ว จะได้แม่พิมพ์นิกเกิลสำหรับการผลิตซ้ำด้วยซิลิโคน PDMS ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ทำความสะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ตามด้วยอะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ ทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 95°C นาน 30 นาที



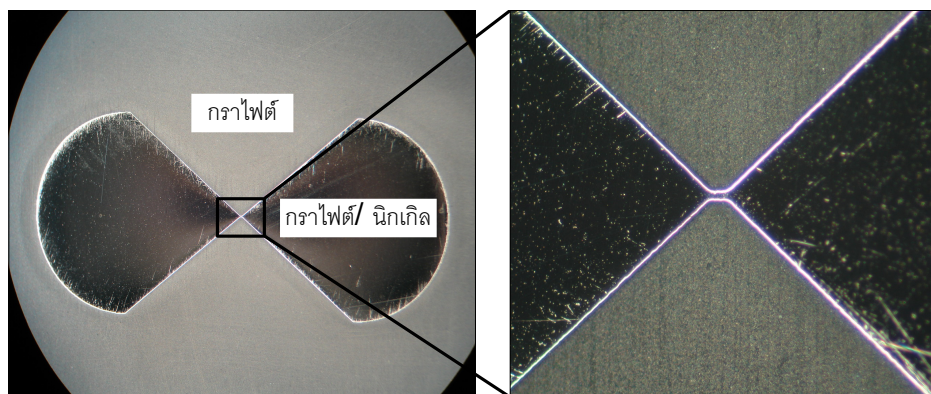
รูปที่ 4.17 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 500



รูปที่ 4.18 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,200



รูปที่ 4.19 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยผ้าขัด DP Nap

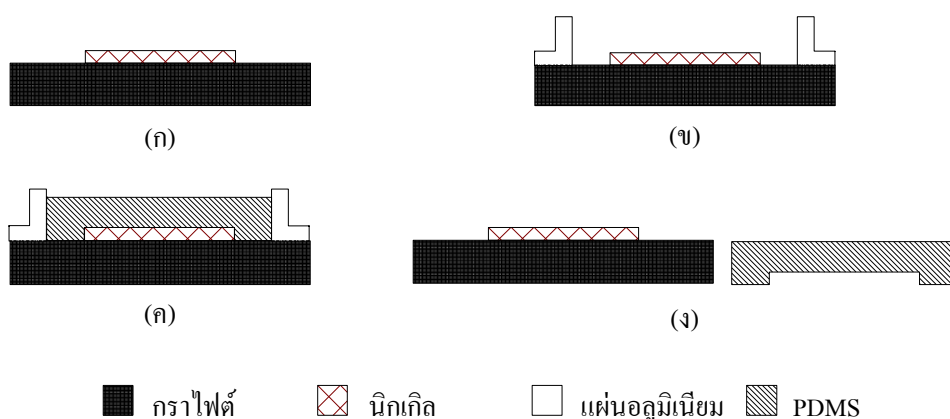


รูปที่ 4.20 ภาพชิ้นงานแม่พิมพ์นิกเกิลช่องทางเดินจุลภาค

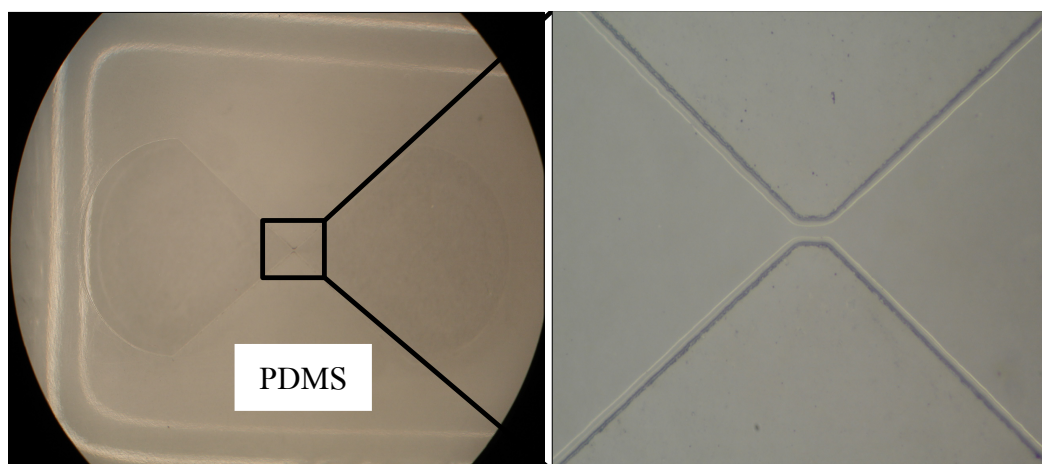
สำหรับปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้าง คือ เกิดฟองอากาศบนผิว SU-8 ในขณะที่อบชิ้นงานทำให้ผิวชิ้นงานไม่เรียบ เกิดเป็นหลุม ดังนั้นทำการดูดฟองอากาศใน SU-8 ออกจนหมดก่อนนำมาเคลือบบนชิ้นงานและแผ่นกราฟต์ที่ใช้ ถ้าไม่สะอาดจะทำให้ SU-8 ไม่ยึดติดกับแผ่นกราฟต์ ขณะอบจะเกิดการหดตัวของ SU-8 เกิดเป็นหลุมขึ้น ทำให้ใช้งานไม่ได้ ดังนั้นต้องทำความสะอาดแผ่นให้ดีก่อนนำมาใช้งาน ไม่ให้มีฝุ่นเกาะและคราบไขมันติดอยู่ สำหรับกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคบนแผ่นกราฟต์ ข้อดีคือ สามารถทำการชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าบนแผ่นกราฟต์ได้ง่ายและนิกเกิลยึดติดบนแผ่นกราฟต์ได้ดี ทำให้เวลาขัดผิวชิ้นงานไม่เกิดปัญหานิกเกิลหลุดจากแผ่นกราฟต์ และสามารถนำแผ่นกราฟต์ที่ใช้งานแล้วมาทำความสะอาด แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่มีข้อเสียคือ เกิดรอยขีดข่วนได้ง่าย ทำให้แบบที่ได้ไม่เหมือนเดิม อีกทั้งต้องระวังเรื่องฝุ่นผงที่เกิดขึ้นและมีราคาแพง

4.2.1.3 การผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS และการสร้างตัวตรวจรู้ เพื่อให้ของเหลวและอนุภาคไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาคได้

การผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS เริ่มจากนำแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกราฟต์ที่เตรียมไว้แสดงดังรูปที่ 4.21 (ก) มาทำบล็อกล้อมรอบทั้ง 4 ด้าน ด้วยแผ่นอะลูมิเนียมสูงประมาณ 1 เซนติเมตร ยึดด้วยเทปกาวเพื่อป้องกันของเหลวไหลออก แสดงดังรูปที่ 4.21 (ข) จากนั้นทำการเตรียมซิลิโคน PDMS โดยผสมส่วนที่ทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวกับส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ในอัตราส่วน 1 : 15 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากัน นำเข้าโถดูดความชื้น เพื่อคูดฟองอากาศออก จากนั้นใช้น้ำมันมะกอกทาให้ตัวแม่พิมพ์นิกเกิลที่เตรียมไว้บาง ๆ รวมทั้งรอบแผ่นอะลูมิเนียมด้วย เนื่องจากเวลาลอกซิลิโคน PDMS ออกจากแม่พิมพ์จะได้ลอกง่ายขึ้น ทำให้ชิ้นงานไม่เสียหาย เมื่อคูดฟองอากาศจนหมดแล้วเทซิลิโคน PDMS ลงในแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ โดยเทด้วยความระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศขึ้น นำเข้าโถดูดความชื้นอีกรอบ เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีฟองอากาศเหลืออยู่ แสดงดังรูปที่ 4.21 (ค) นำเข้าเตาอบเพื่อให้ซิลิโคน PDMS แข็งตัวเร็วขึ้น ที่อุณหภูมิ 90°C นาน 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นลอกซิลิโคน PDMS ออกจากแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 4.21 (ง) นำช่องทางเดินจุลภาคที่ทำด้วยซิลิโคน PDMS ไปทำความสะอาด โดยล้างในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ อะซิโตน ตามด้วยน้ำบริสุทธิ์ และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C นาน 30 นาที ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 4.22 ช่องทางเดินจุลภาคที่สร้างโดยใช้ซิลิโคน PDMS หลังจากลอกออกจากแม่พิมพ์ ส่วนแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกราฟต์ ทำความสะอาดโดยการล้างในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ อะซิโตน น้ำบริสุทธิ์ และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C นาน 30 นาที ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเพื่อที่จะนำไปใช้ในครั้งต่อ ๆ ไปได้

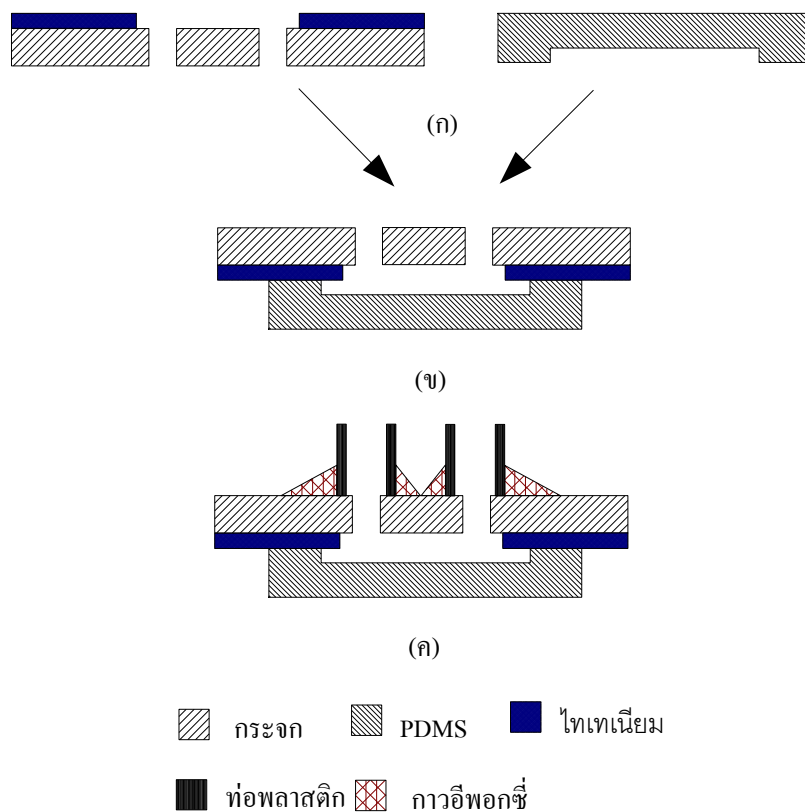


รูปที่ 4.21 การผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS

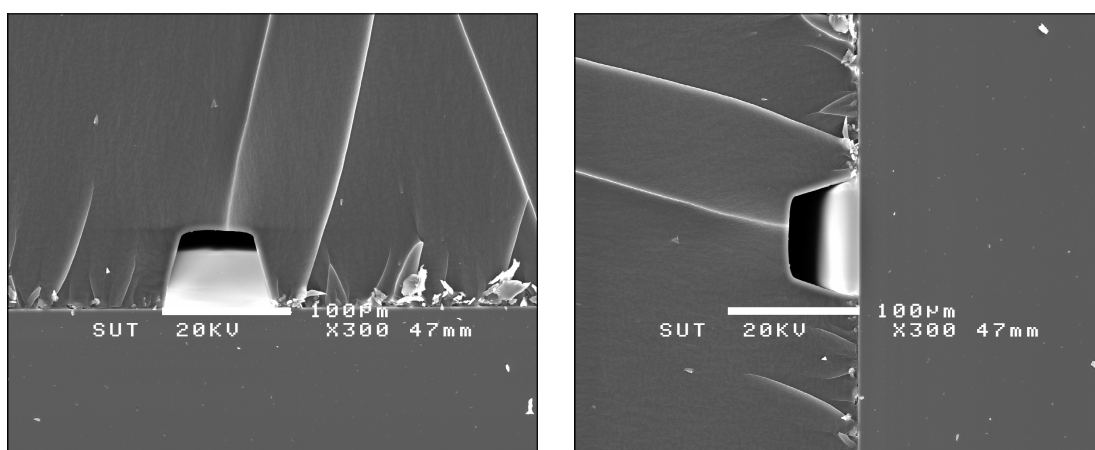


รูปที่ 4.22 ช่องทางเดินจุลภาคที่สร้างโดยใช้ซิลิโคน PDMS

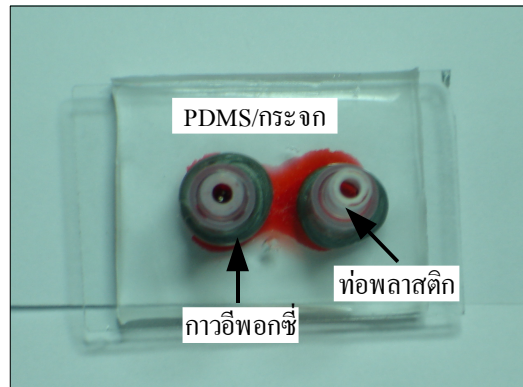
ขั้นตอนต่อมาเป็นการบอนด์ระหว่างช่องทางเดินจุลภาคที่สร้างโดยใช้ ซิลิโคน PDMS กับแผ่นกระจกที่มีทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้ง ขั้วอิเล็กโทรด เพื่อสร้างตัวตรวจรู้ให้สมบูรณ์ กระบวนการบอนด์เริ่มจาก ทำความสะอาดชิ้นงานทั้ง 2 ชั้น ดังรูปที่ 4.23 (ก) จากนั้นวางบนจานแก้วเพื่อนำไปทำพลาสมาของออกซิเจนที่ความดัน 0.26 mbar กำลัง RF 100 W เป็นเวลา 1 นาที นำชิ้นงานทั้ง 2 ประกอบกันโดยใช้ปากคีบกดชิ้นงานทั่วทั้งแผ่นเพื่อให้ชิ้นงานติดกัน แสดงดังรูปที่ 4.23 (ข) แล้วนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 80°C นาน 4 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานแข็งแรงขึ้น ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง หลังจากสร้างตัวตรวจรู้เพื่อให้ของเหลวและอนุภาคไหลผ่าน ช่องทางเดินจุลภาค จากนั้นทำการยึดท่อพลาสติกที่ทางเข้า-ออกของของเหลวโดยใช้กาวอีพอกซีในการยึดติดท่อพลาสติกกับแผ่นกระจก ปล่อยให้แห้งประมาณ 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.23 (ค) หลังจากบอนด์แล้วนำตัวตรวจรู้ไปทำการวัดช่องทางเดินจุลภาคด้วยเครื่อง SEM โดยช่องทางเดินจุลภาค มีความกว้างประมาณ 90 μm และมีความสูงประมาณ 50 μm ดังรูปที่ 4.24 นำตัวตรวจรู้ที่ได้ไปทำการทดสอบการรั่วไหลของของเหลว โดยทดสอบกับน้ำหมึกสีแดงเหตุผลที่ใช้สีน้ำหมึกสีแดงในการทดสอบ เนื่องจากสามารถมองเห็นการไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาคได้ และยังสามารถตรวจสอบได้ว่ามีของเหลวซึมออกด้านข้างหรือไม่ ถ้าของเหลวมีการ ซึมออกด้านข้าง แสดงว่าการ บอนด์ไม่ติดกันสนิท อาจเนื่องมาจากฝุ่น หรือผิวของ ชิ้นงาน ไม่เรียบ ทำให้ของเหลวสามารถ ซึมออกด้านข้างได้ แสดงดังรูปที่ 4.25 ภาพทดสอบการไหลของน้ำหมึกสีแดง มีของเหลวซึมออกด้านข้าง และรูปที่ 4.26 ภาพทดสอบการไหลของน้ำหมึกสีแดง ไม่มีของเหลวซึมออกด้านข้างแสดงว่าการบอนด์ติดกันสนิท สามารถนำไปใช้ในการทดลองต่อไปได้ จากนั้นนำตัวตรวจรู้ที่ได้ไปทำการเชื่อมต่อสายไฟด้วยกาวนำไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.27 เพื่อนำไปทดสอบการทำงานต่อไป



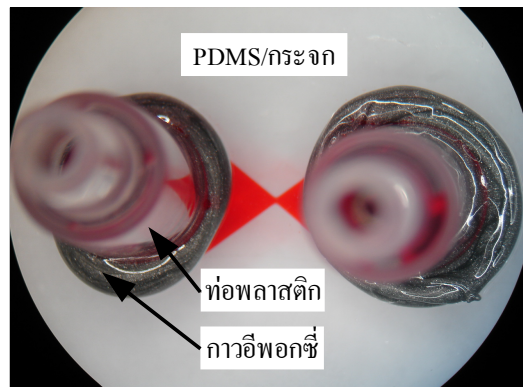
รูปที่ 4.23 การบอนด์ระหว่าง PDMS ที่ทำเป็นช่องทางเดินจุลภาคกับแผ่นกระดาษ
ที่มีทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรด



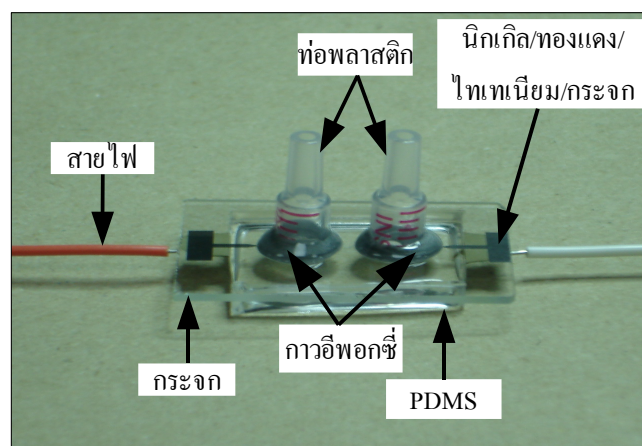
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ช่องทางเดินจุลภาคกว้างประมาณ $90 \mu\text{m}$
และมีความสูงประมาณ $50 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.25 ภาพทดสอบการไหลของน้ำหมึกสีแดงมีของเหลวซึมออกด้านข้าง



รูปที่ 4.26 ภาพทดสอบการไหลของน้ำหมึกสีแดงไม่มีของเหลวซึมออกด้านข้าง



รูปที่ 4.27 ภาพตัวตรวจรู้สร้างจากแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกราฟไฟต์

4.2.1.4 สรุป

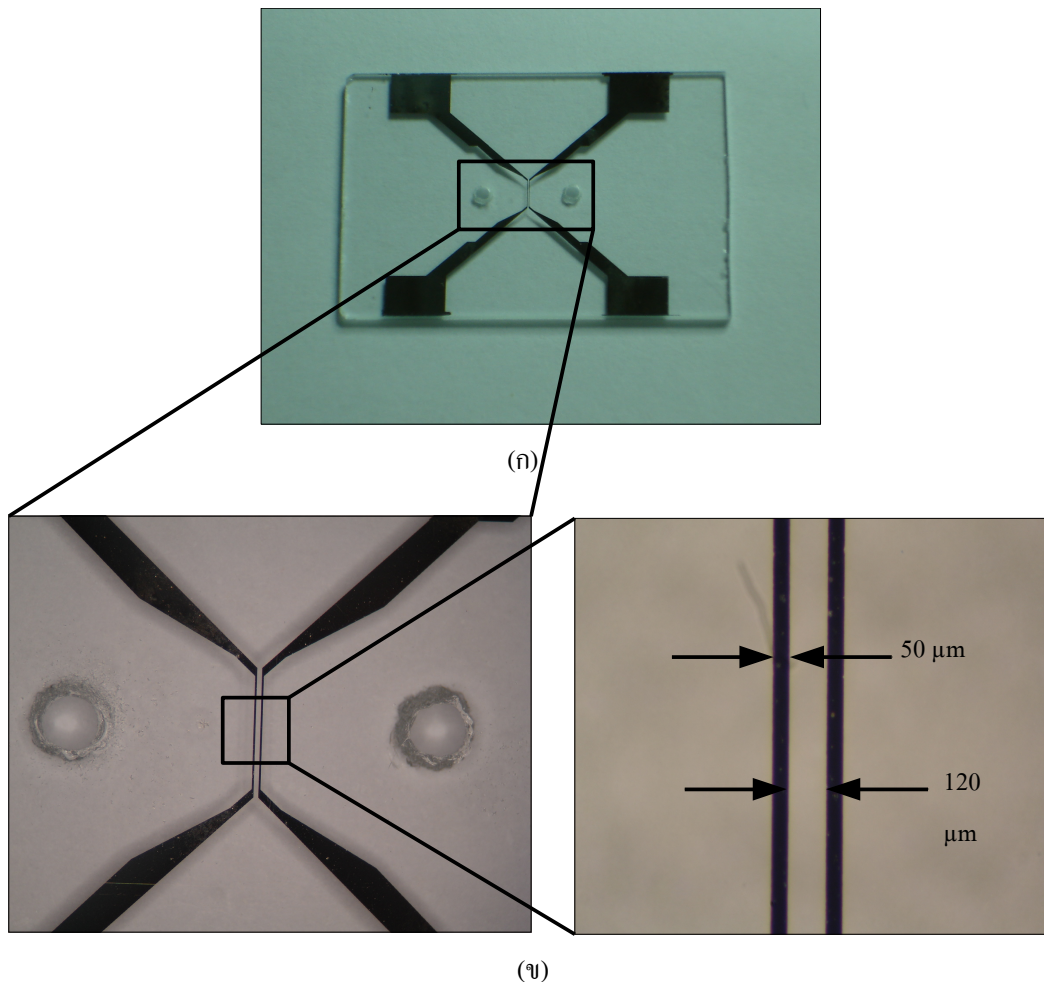
การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกราฟไฟต์ เริ่มจากการทำช่องทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก โดยทำการเจาะรูกระจกก่อน การเจาะรูกระจกมีด้วยกัน 2 วิธี วิธีแรกการเจาะรูกระจกด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก เข้มข้น 48% ซึ่งวิธีดังกล่าวไม่สามารถควบคุมขนาดของรูได้และใช้เวลาในการเจาะรูกระจกนานกว่าวิธีการยิงทราย ในการเจาะรูกระจกซึ่งสามารถควบคุมขนาดของรูได้ดีกว่าและใช้เวลาในการเจาะน้อยกว่า จากนั้นนำไปเคลือบด้วยฟิล์มโลหะ 3 ชั้น ได้แก่ ไทเทเนียม ทองแดง นิกเกิล ตามลำดับ เพื่อทำลวดลายขั้วอิเล็กโทรด ขั้นตอนต่อมาเป็นการสร้างแม่พิมพ์ของช่องทางเดินจุลภาคด้วยนิกเกิลบนแผ่นกราฟไฟต์ เพื่อการผลิตช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS ในการผลิตช่องทางเดินจุลภาค ต้องทาด้วยน้ำมันมะกอกบาง ๆ ก่อนเพื่อที่จะทำการลอก PDMS ออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายและสามารถนำแม่พิมพ์กลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ปัญหาที่พบคือ บางครั้งในการลอกซิลิโคน PDMS ออกจากแม่พิมพ์จะยังคงมีชิ้นส่วนเล็ก ๆ ของซิลิโคน PDMS ติดบนแผ่นกราฟไฟต์ ซึ่งทำความสะอาดออกได้ยาก และจากการทดสอบยังพบว่าหลังจากผลิตช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS บนแม่พิมพ์นิกเกิลมากกว่า 3 ครั้งขึ้นไป ช่องทางเดินจุลภาคที่สร้างโดยใช้ซิลิโคน PDMS ตรงด้านล่างที่ติดกับแผ่นกราฟไฟต์ที่ได้ไม่มีความใสเหมือนเดิม เริ่มเป็นสีขาวขุ่น เมื่อนำไปทำการบอนด์กับแผ่นกระจกที่มีทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรด ทำให้ชิ้นส่วนทั้งสองไม่ติดกัน ไม่สามารถนำไปใช้งานต่อได้ จึงทำการพัฒนาแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคบนแผ่นกระจกขึ้นดังที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.2.2 การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกระจกแบบที่ 1

การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกระจกแบบที่ 1 เพื่อแก้ปัญหาการบอนด์ที่เกิดขึ้น ได้แบ่งการสร้างออกเป็น 3 ส่วน เหมือนกับการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกราฟไฟต์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.2.1 การสร้างช่องทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก

กระบวนการสร้างช่องทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรดของช่องทางเดินจุลภาคบนแผ่นกระจก เหมือนกับของการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกราฟไฟต์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งขั้วอิเล็กโทรดแต่ละด้าน กว้าง $50 \mu\text{m}$ และ ระยะห่าง ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง คือ $120 \mu\text{m}$ ขั้วอิเล็กโทรดอยู่กึ่งกลางระหว่างช่องทางเข้า-ออกของของเหลว แสดงดังรูปที่ 4.28 (ก) ทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก (ข) ภาพขยายของขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก

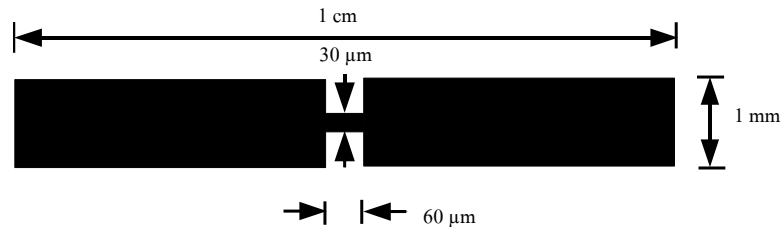


รูปที่ 4.28 (ก) ทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก
(ข) ภาพขยายของขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก

4.2.2.2 การสร้างแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1

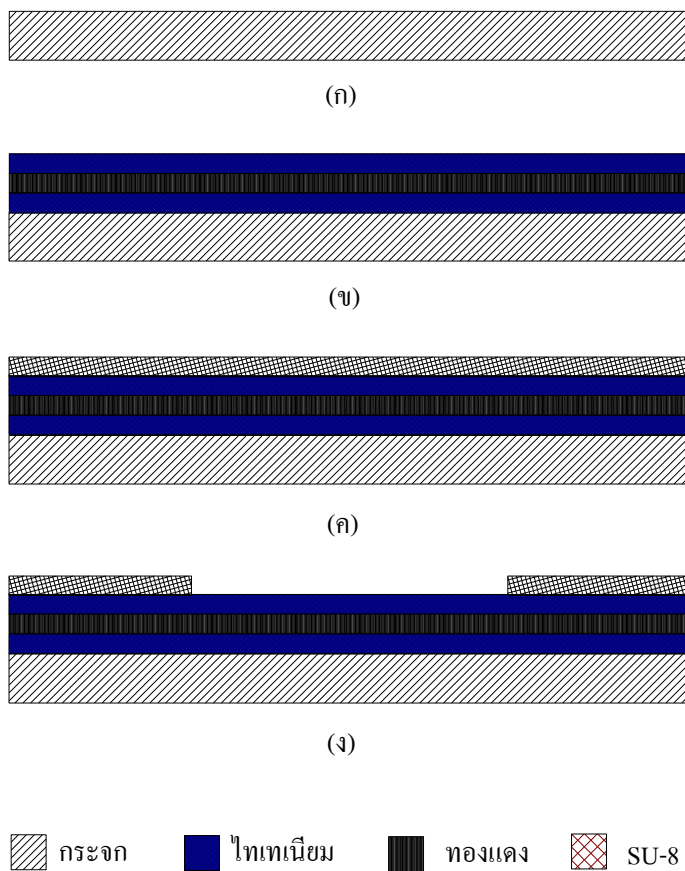
ลำดับกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 ด้วยกระบวนการชุบนิกลด้วยไฟฟ้าบนชั้นไทเทเนียมและทองแดง ซึ่งเป็นชั้นฐานรองบนแผ่นกระจก แสดงดังรูปที่ 4.30 โดยเริ่มจาก เตรียมแผ่นกระจกขนาด 1 นิ้ว x 1.5 นิ้ว หนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.30 (ก) ถูกนำไปเคลือบด้วยฟิล์มโลหะ 3 ชั้น ได้แก่ ไทเทเนียมหนาประมาณ 500 อังสตรอม ทองแดงหนาประมาณ 1,500 อังสตรอม และไทเทเนียมหนาประมาณ 500 อังสตรอม แสดงดังรูปที่ 4.30 (ข) จากนั้นหมุนเคลือบสารไวแสงโฟโตรีซิสชนิดลบ SU-8 100 ด้วยความเร็วการหมุน 500 รอบ/นาทีเป็นเวลา 5 วินาที แล้วต่อด้วย 3,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที และนำไปอบให้แห้ง (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 4.30 (ค) นำมาฉายแสง

ผ่านโพโตมาสก์และอบเน้นลวดลาย (post-exposure bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ล้างฟิล์ม จะได้แม่พิมพ์ขึ้นรูปโครงสร้าง SU-8 ที่มีหลุมเป็นรูปช่องทางเดินจุลภาคอยู่บนแผ่นกระจกที่เคลือบด้วยฟิล์มโลหะ 3 ชั้น แสดงดังรูปที่ 4.30 (ง)



รูปที่ 4.29 แบบแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคที่ออกแบบด้วยโปรแกรมวาดลวดลาย LASI

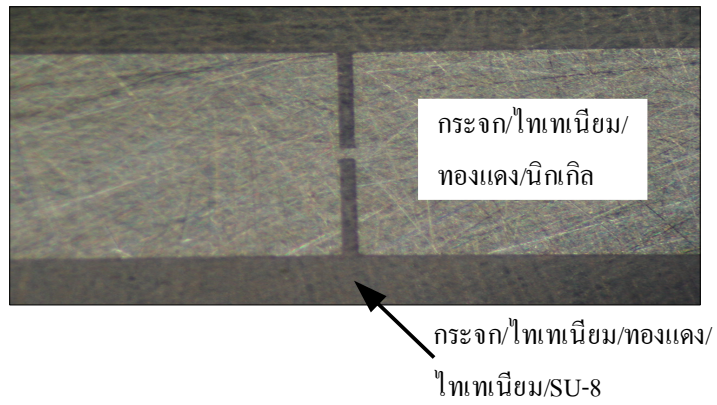
เมื่อได้แม่พิมพ์ขึ้นรูปโครงสร้าง SU-8 แล้ว เติมโลหะนิกเกิลลงในช่องทางเดินจุลภาคโดยการชุบด้วยไฟฟ้า ใช้ความหนาแน่นกระแส 1 mA/cm^2 จนมวลนิกเกิลสั้นจากแม่พิมพ์ขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ก่อนทำการชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าต้อง สกัดชั้นไทเทเนียมด้านบนออกก่อน เนื่องจากนิกเกิลยึดติดกับทองแดงได้ดีกว่าไทเทเนียม ต่อไปเป็นการขัดผิวนิกเกิลให้เรียบ เริ่มจากการขัดผิวนิกเกิลให้เสมอกับผิว SU-8 ก่อน ด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์เบอร์ 1,200 ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 4.32 จากนั้นเปลี่ยนเป็นขัดผิวนิกเกิลด้วยผ้าขัดมัน DP Nap โดยใช้ผงขัดอะลูมินาขนาด $3 \mu\text{m}$ และ $1 \mu\text{m}$ ตามลำดับ จะได้ผิวนิกเกิลและ SU-8 ที่เรียบมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.33 นำชิ้นงานที่ได้ไปต้มในน้ำยา remover PG ซึ่งละลายพันธะของ SU-8 ได้ เมื่อ SU-8 หลุดออกหมด สกัดชั้นไทเทเนียม ทองแดง และไทเทเนียมออกตามลำดับ จะได้แม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกระจกของช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.34 ล้างด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ อะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้าง คือ เกิดฟองอากาศบนผิว SU-8 ในขณะที่อบชิ้นงาน ทำให้ผิวชิ้นงานไม่เรียบ เกิดเป็นหลุม ดังนั้นตอนที่ทำการเคลือบ SU-8 พยายามอย่าให้มีฟองอากาศเกิดขึ้น และแผ่นกระจกที่ใช้ถ้าไม่สะอาดจะทำให้ SU-8 ไม่ยึดติดกับแผ่นกระจก ขณะอบจะเกิดการหดตัวของ SU-8 เกิดเป็นหลุมขึ้น ใช้งานไม่ได้ ดังนั้นต้องทำความสะอาดแผ่นให้สะอาดก่อนนำมาใช้งาน ไม่ให้มีฝุ่นและคราบไขมันติดอยู่ การสร้างแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคบนแผ่นกระจกแบบที่ 1 มีข้อดี คือ ทำการชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าได้ง่าย และนิกเกิลยึดติดบนแผ่นกระจกดี เวลาขัดผิวชิ้นงานไม่เกิดปัญหานิกเกิลหลุดจากฐานรอง และสามารถนำแผ่นกระจกที่ใช้งานแล้ว นำมากลับมาใช้ใหม่ได้ กระจกเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายมีขายตามท้องตลาด แต่มีข้อเสีย คือ เนื่องจากฐานรองเป็นแผ่นกระจกอาจแตกได้จึงต้องทำด้วยความระมัดระวัง



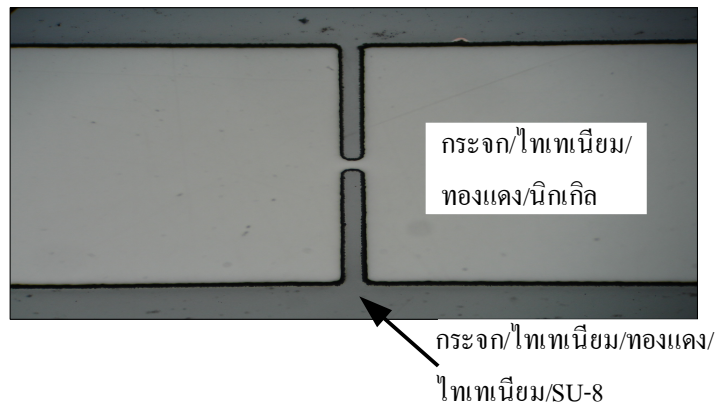
รูปที่ 4.30 กระบวนการสร้างแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคด้วยสารไวแสงโฟโตริซิชชนิดลบ SU-8



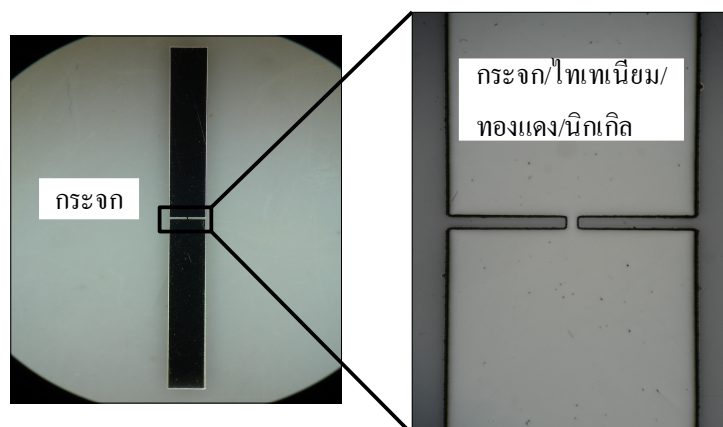
รูปที่ 4.31 ภาพมวลนิกเกิลสันจากแม่พิมพ์โครงสร้าง SU-8



รูปที่ 4.32 ภาพชิ้นงานที่ตัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,200

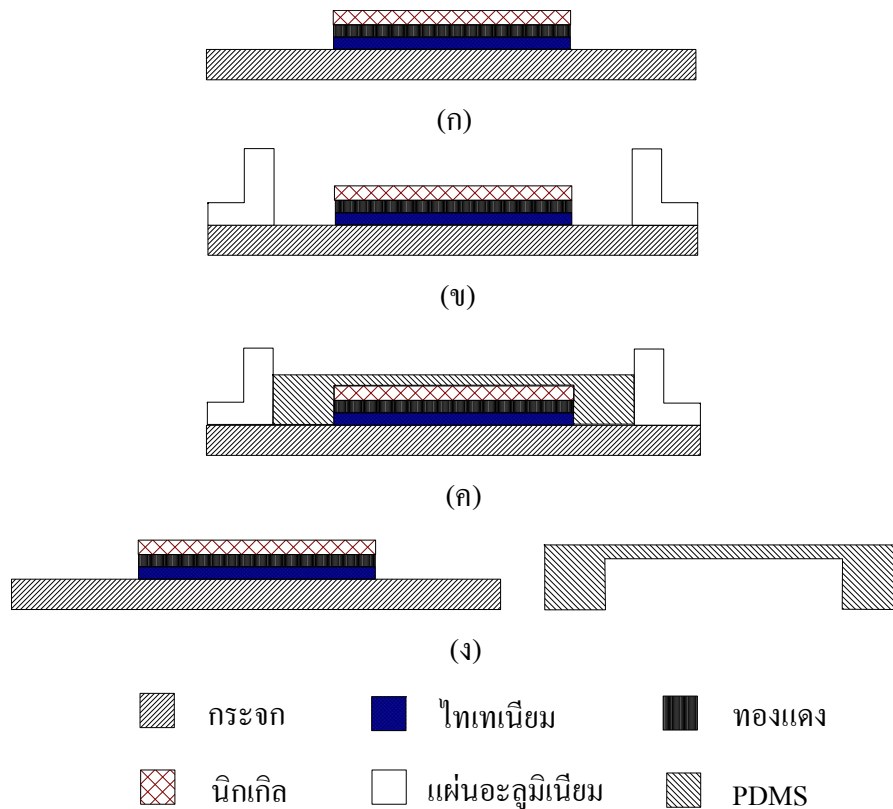


รูปที่ 4.33 ภาพชิ้นงานที่ตัดด้วยผ้าขัด DP Nap



รูปที่ 4.34 ภาพชิ้นงานแม่พิมพ์นิกเกิลช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1

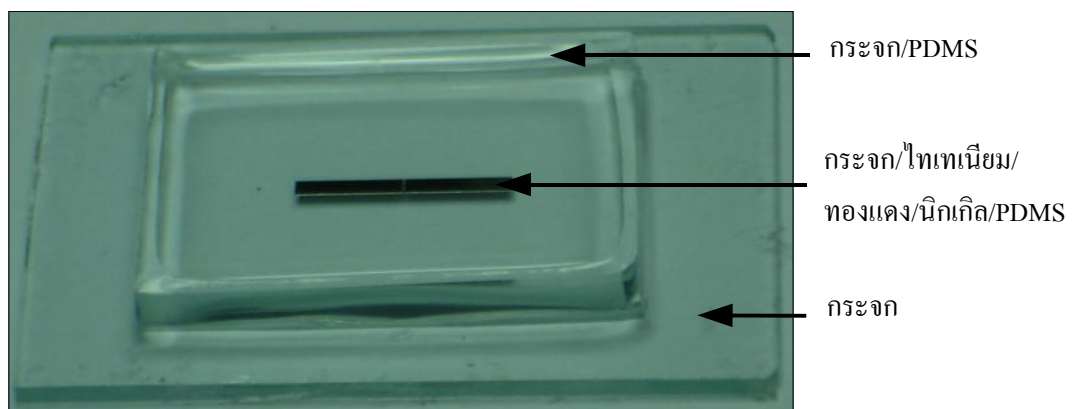
4.2.2.3 การผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS และการสร้างตัวตรวจรู้เพื่อให้ของเหลวและอนุภาคไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาคได้



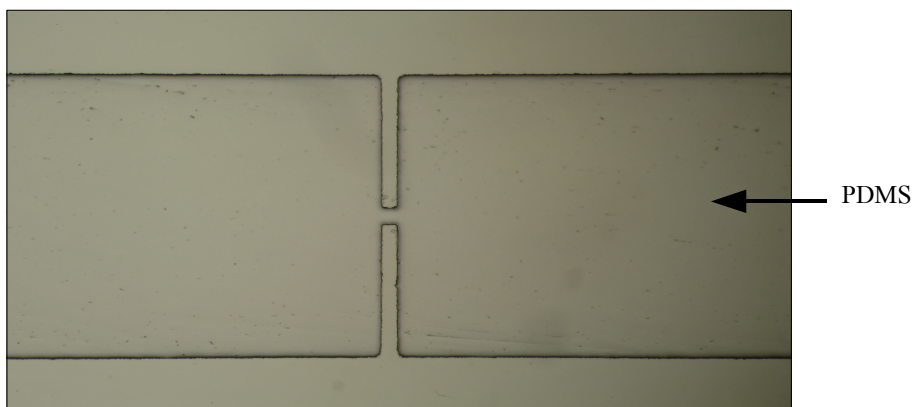
รูปที่ 4.35 การผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 โดยใช้ซิลิโคน PDMS

การผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS เริ่มจากนำแม่พิมพ์นิกเกิลช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 ที่เตรียมไว้ แสดงดังรูปที่ 4.35 (ก) มาทำบล็อกล้อมรอบทั้ง 4 ด้านด้วยแผ่นอะลูมิเนียมสูงประมาณ 1 เซนติเมตร ยึดด้วยเทปกาวเพื่อป้องกันของเหลวไหลออก แสดงดังรูปที่ 4.35 (ข) จากนั้นทำการเตรียมซิลิโคน PDMS โดยผสมส่วนที่ทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวกับส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ ในอัตราส่วน 1 : 15 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากัน นำเข้าโถดูดความชื้น เพื่อดูดฟองอากาศออก จากนั้นใช้น้ำมันมะกอกทาให้ทั่วแม่พิมพ์นิกเกิลที่เตรียมไว้บาง ๆ รวมทั้งรอบแผ่นอะลูมิเนียมด้วย เนื่องจากเวลาลอกซิลิโคน PDMS ออกจากแม่พิมพ์จะได้ลอกง่ายขึ้น ทำให้ชิ้นงานไม่เสียหาย เมื่อดูดฟองอากาศจนหมดแล้วเทซิลิโคน PDMS ลงในแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ โดยเทด้วยความระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศขึ้น นำเข้าโถดูดความชื้นอีกรอบ เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีฟองอากาศเหลืออยู่ แสดงดังรูปที่ 4.35 (ค) นำเข้าเตาอบเพื่อให้ซิลิโคน PDMS แข็งตัวเร็วขึ้น ที่อุณหภูมิ

90°C นาน 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นลอกซิลิโคน PDMS ออกจากแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 4.35 (ง) นำช่องทางเดินจุลภาคที่ทำด้วยซิลิโคน PDMS ไปทำความสะอาดโดยล้างด้วย ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ อะซิโตน น้ำบริสุทธิ์ และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน อบอุ่นความชื้นที่ อุณหภูมิ 90°C นาน 30 นาที ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 4.36 (ก) ก่อนลอกช่องทางเดิน จุลภาคซิลิโคน PDMS ออกจากแม่พิมพ์ (ข) ช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 ทำด้วย ซิลิโคน PDMS นำชิ้นงานที่ได้ไปทำความสะอาดโดยการล้างด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ อะซิโตน น้ำบริสุทธิ์ และ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน นำไปอบอุ่นความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C นาน 30 นาที ปล่อยให้เย็นที่ อุณหภูมิห้อง เพื่อที่จะนำไปใช้งานต่อไป



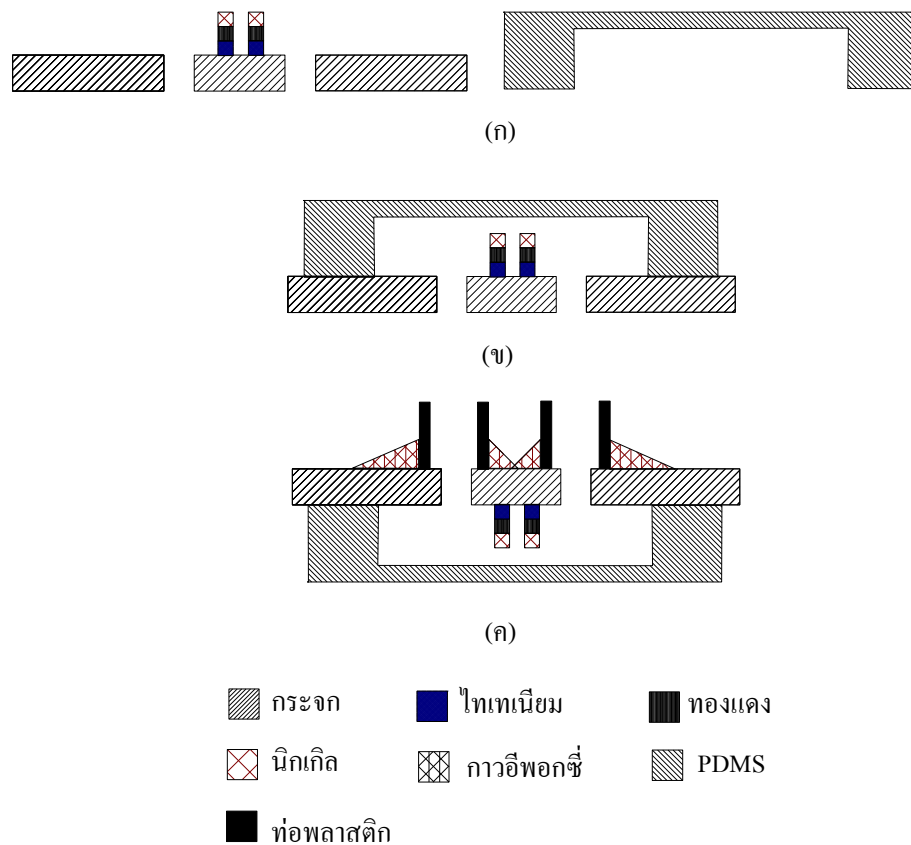
(ก)



(ข)

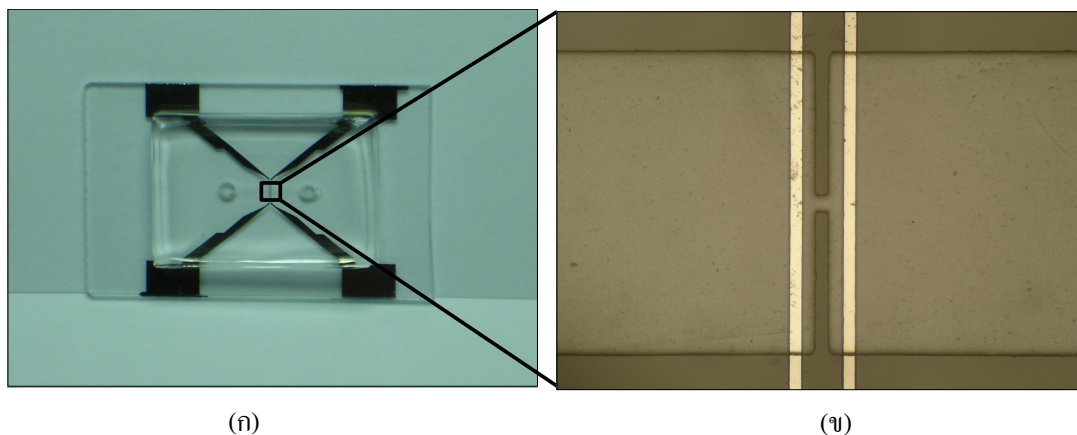
รูปที่ 4.36 (ก) ก่อนลอกซิลิโคน PDMS ออกจากแม่พิมพ์
(ข) ช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 ทำด้วยซิลิโคน PDMS

ขั้นตอนต่อมาเป็นการบอนด์ระหว่างช่องทางเดินจุลภาค ที่สร้างโดยใช้ซิลิโคน PDMS กับแผ่นกระจกที่มีทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรด เพื่อสร้างตัวตรวจรู้ให้สมบูรณ์ กระบวนการบอนด์เริ่มจาก ทำความสะอาดชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้น ดังรูปที่ 4.37 (ก) จากนั้นวางบนจานแก้วเพื่อนำไปทำพลาสมาของออกซิเจนที่ความดัน 0.26 mbar กำลัง RF 100 W เป็นเวลา 1 นาที นำชิ้นงานทั้ง 2 ประกอบกัน โดยใช้ น้ำหยดลงบนช่องทางเดินจุลภาคที่สร้างโดยใช้ซิลิโคน PDMS ให้ทั่วทั้งแผ่นแล้วทำการบอนด์เพื่อให้ชิ้นงานติดกัน แสดงดังรูปที่ 4.37 (ข) จากนั้นนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 80°C นาน 4 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานแข็งแรงขึ้น ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง เป็นการเสร็จสิ้นขั้นตอนการบอนด์ในการ ทำช่องทางเดินจุลภาค หลังจากสร้างตัวตรวจรู้เพื่อให้ของเหลวและ อนุภาคไหลผ่าน ช่อง ทาง เดิน จุลภาค ทำการยึด ท่อ พลาสติก ที่ บริเวณ ทาง เข้า-ออก ของของเหลว โดยใช้กาวอีพอกซีในการยึดติดท่อพลาสติกกับแผ่นกระจก ปล่อยให้แห้งประมาณ 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.37 (ค)

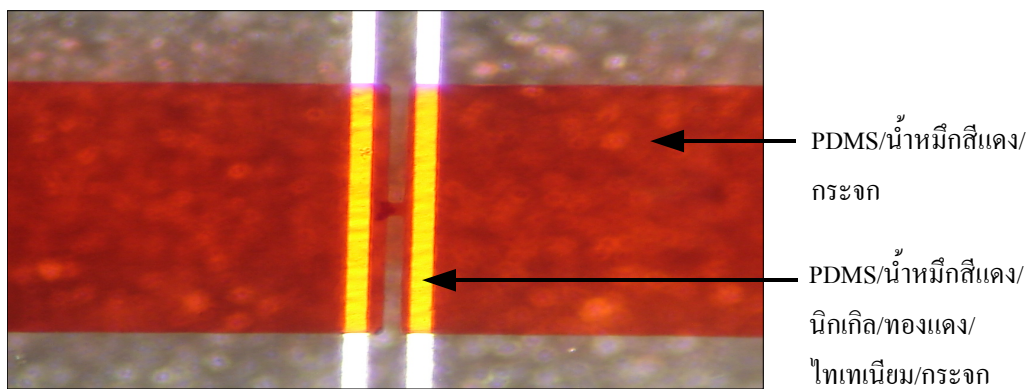


รูปที่ 4.37 การบอนด์ระหว่าง PDMS ที่ทำเป็นช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 กับแผ่นกระจกที่มีทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรด

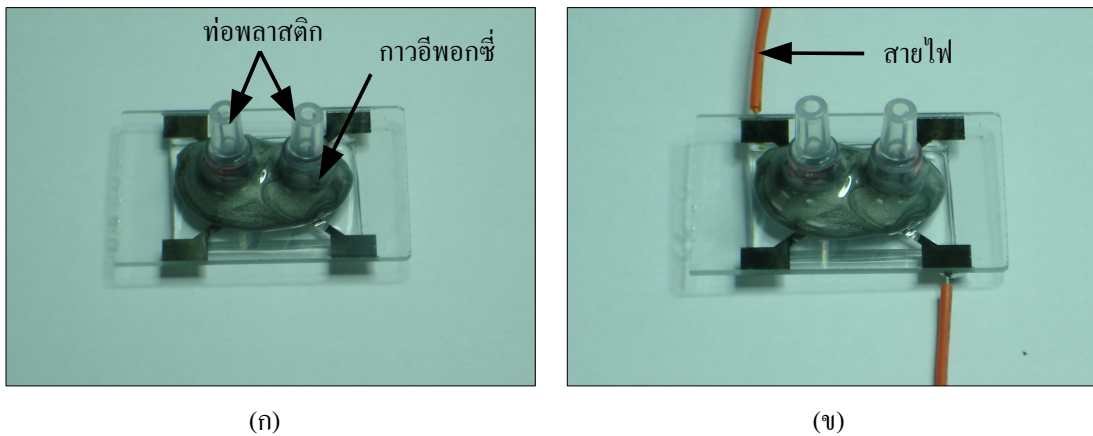
ตัวตรวจรู้ที่สร้างเสร็จแล้ว แสดงดังรูปที่ 4.38 ไปทดสอบการรั่วไหลของของเหลว โดยทดสอบกับน้ำหมึกสีแดง เหตุผลที่ใช้สีน้ำหมึกสีแดงในการทดสอบ เนื่องจากสามารถมองเห็นการไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาคได้ และยังสามารถตรวจสอบได้ว่ามีของเหลวซึมออกด้านข้างหรือไม่ แสดงดังรูปที่ 4.39 ภาพทดสอบการไหลของน้ำหมึกสีแดง ไม่มีของเหลวซึมออกด้านข้าง แสดงว่าการบอนด์ติดกันสนิท สามารถนำไปใช้ในการทดลองต่อไปได้ นำตัวตรวจรู้ที่ได้ไปทำการเชื่อมต่อสายไฟด้วยการบัดกรี แสดงดังรูปที่ 4.40 (ก) ตัวตรวจรู้ที่ยังไม่เชื่อมต่อสายไฟ และ (ข) ตัวตรวจรู้ที่เชื่อมต่อสายไฟแล้ว เมื่อได้ตัวตรวจรู้ที่สมบูรณ์ นำมาทดสอบกับของเหลวที่มีอนุภาคผสมอยู่ ให้ไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาค ปรากฏว่าอนุภาคไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาคได้บางส่วน แต่บางส่วนยังติดอยู่ที่ผนังของช่องทางเดินจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.41



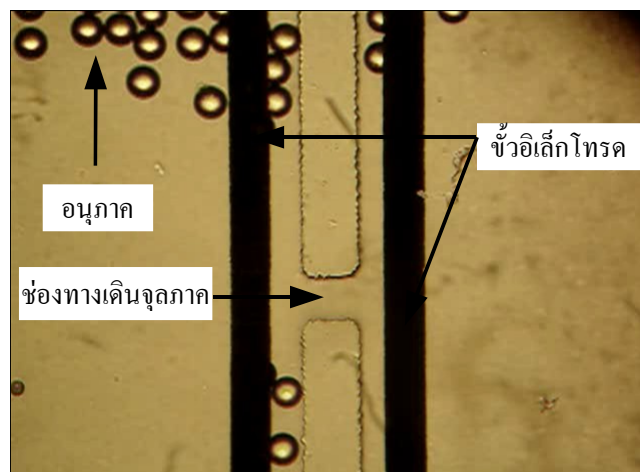
รูปที่ 4.38 ตัวตรวจรู้ของช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1



รูปที่ 4.39 ทดสอบการไหลของน้ำหมึก โดยไม่มีของเหลวซึมออกด้านข้าง



รูปที่ 4.40 (ก) ตัวตรวจรู้ที่ยังไม่เชื่อมต่อสายไฟ (ข) ตัวตรวจรู้ที่เชื่อมต่อสายไฟ



รูปที่ 4.41 ของเหลวและอนุภาคผ่านช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 ได้ และมีอนุภาคบางส่วนติดอยู่ที่ผนังของช่องทางเดิน

4.2.2.4 สรุป

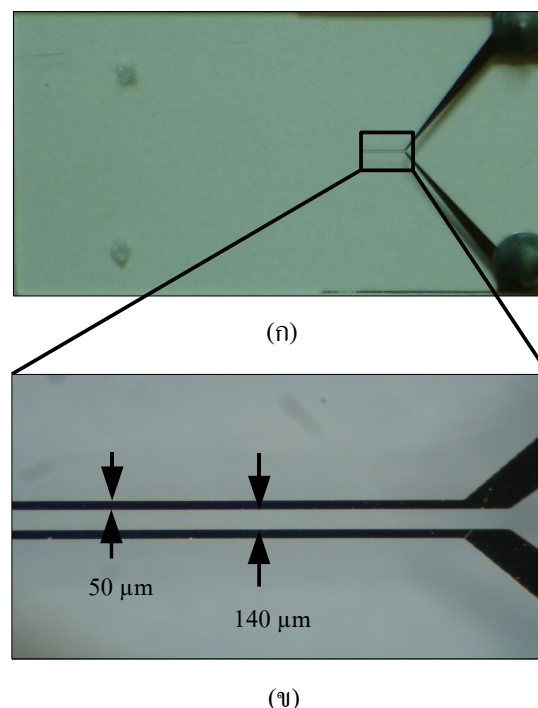
การออกแบบ และสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกระจกแบบที่ 1 สามารถทำได้ง่ายกว่าบนแผ่นกราฟไฟด์ เมื่อทำการผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคด้วยซิลิโคน PDMS ก็สามารถลอกออกจากแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกระจกได้ง่าย โดยที่ไม่ต้องใช้อะไรรองพื้นก่อนเหมือนทำบนแผ่นกราฟไฟด์ ทั้งยังนำแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกระจกกลับมาใช้ใหม่ได้หลาย ๆ ครั้ง และช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 ที่ทำด้วยซิลิโคน PDMS ยังใสเหมือนเดิม ในการ บอนด์แผ่นกระจกที่มีช่องทางเข้า-ออกของของเหลวที่มีหัวอิเล็กทรอนิกส์กับ

ช่องทางเดินจุลภาคที่ทำด้วยซิลิโคน PDMS มีการหยคน้ำบริสุทธิ์ให้ทั่วแผ่นช่องทางเดินจุลภาคที่ทำด้วยซิลิโคน PDMS ก่อน เพื่อให้สามารถเลื่อนชิ้นงานให้ตรงตามที่ต้องการได้ เพราะว่าถ้าหากชิ้นงานที่ผ่านการทำพลาสมาของออกซิเจนที่ ความดัน 0.26 mbar กำลัง RF 100 W เป็นเวลา 1 นาทีแล้วเมื่อนำมาประกบกันจะไม่สามารถเลื่อนชิ้นงานได้ จากผลการทดสอบการไหลของของเหลวที่มีอนุภาคผสมอยู่ผ่านช่องทางเดินจุลภาค ผลที่ได้อนุภาคส่วนใหญ่ติดอยู่ที่ผนังกันของช่องทางเดินจุลภาคไม่สามารถผ่านไปได้ จึงได้ทำการออกแบบช่องทางเดินจุลภาคบนแผ่นกระจกแบบที่ 2 ขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.2.3 การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกระจกแบบที่ 2

การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกระจกแบบที่ 2 เป็นแบบที่ใช้ในการทดสอบนับจำนวนอนุภาคของวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งเป็นแบบที่ได้พัฒนามาจากแบบก่อนหน้าเพื่อแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น จากกระบวนการสร้างและกระบวนการทดสอบ ดังที่แสดงรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.3.1 การสร้างช่องทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก

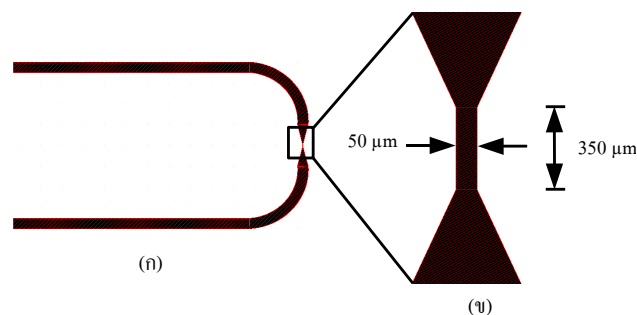


รูปที่ 4.42 (ก) รูปทางเข้า-ออกของของเหลวที่มีขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก
(ข) ภาพขยายของขั้วอิเล็กโทรด

กระบวนการสร้างช่องทางเข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กโทรดของช่องทางเดินจุลภาคบนแผ่นกระจกแบบที่ 2 เหมือนกับแบบที่ 1 โดยใช้การยิงทรายในการสร้างช่องทางเข้า-ออกของของเหลว เพราะสามารถควบคุมขนาดของรูได้ตามต้องการและประหยัดเวลาในการสร้างด้วย ส่วนขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจกทำมาจากฟิล์มโลหะของไทเทเนียมหนาประมาณ 500 อังสตรอม ทองแดงหนาประมาณ 1,500 อังสตรอม นิกเกิลหนาประมาณ 500 อังสตรอม และทองหนาประมาณ 500 อังสตรอม โดยทำการชุบทองด้วยไฟฟ้าเป็นชั้นสุดท้ายเพื่อให้ขั้วอิเล็กโทรดมีความแข็งแรงและสามารถนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.42 (ก) รูปทางเข้า-ออกของของเหลวที่มีขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก (ข) ภาพขยายของขั้วอิเล็กโทรด โดยที่ขั้วอิเล็กโทรดมีความกว้าง $50 \mu\text{m}$ และวางห่างกัน $140 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ กระบวนการสร้างโดยละเอียดกล่าวไว้ในภาคผนวก ค

4.2.3.2 การสร้างแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 2

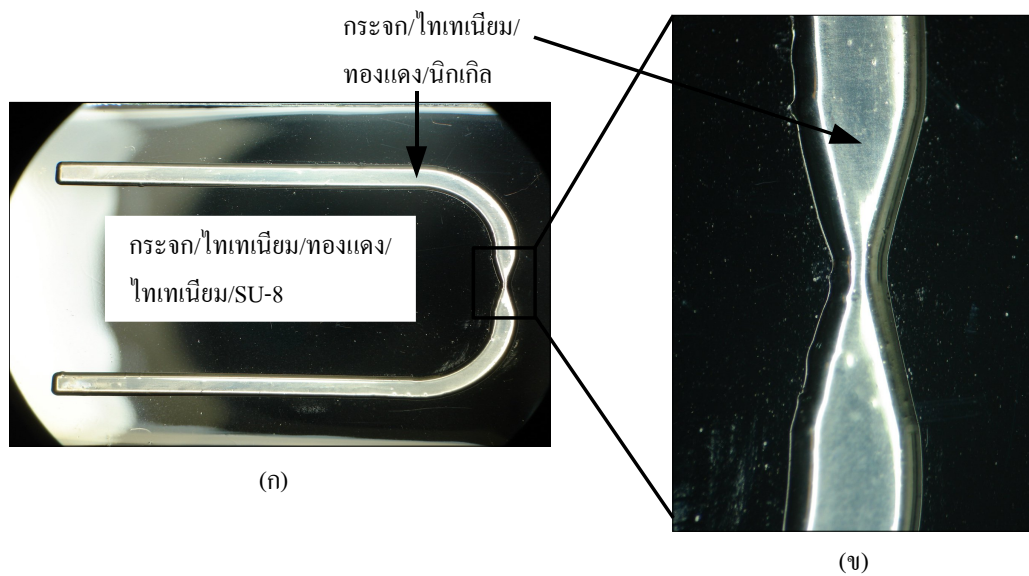
แบบแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคที่ออกแบบด้วยโปรแกรมวาดลวดลาย LASI แสดงดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 แบบแม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคที่ออกแบบด้วยโปรแกรมวาดลวดลาย LASI

ลำดับกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ของช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 2 ด้วยกระบวนการชุบ นิกเกิลด้วยไฟฟ้าบนชั้นไทเทเนียมและทองแดง ซึ่งเป็นชั้นฐานรองบนแผ่นกระจกเหมือนช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 เมื่อได้แม่พิมพ์ขึ้นรูปโครงสร้าง SU-8 แล้วเติมโลหะ นิกเกิลลงในช่องทางเดินจุลภาคโดยการชุบด้วยไฟฟ้า ซึ่งใช้ความหนาแน่นกระแส 1 mA/cm^2 จนมวลนิกเกิลล้นจากแม่พิมพ์ขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 4.44 ก่อนทำการชุบโลหะ นิกเกิลด้วยไฟฟ้าต้องสกัดชั้นไทเทเนียมด้านบนออกก่อน เนื่องจากนิกเกิลยึดติดกับทองแดงได้ดีกว่าไทเทเนียม ขั้นตอนต่อไปเป็นการขัดผิวนิกเกิลให้เรียบ เริ่มจากการขัดผิวนิกเกิลให้เสมอกับผิว SU-8 ก่อน ด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์เบอร์ 1,200 โดยใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 4.45 จากนั้นเปลี่ยนเป็นขัดผิวนิกเกิลด้วย

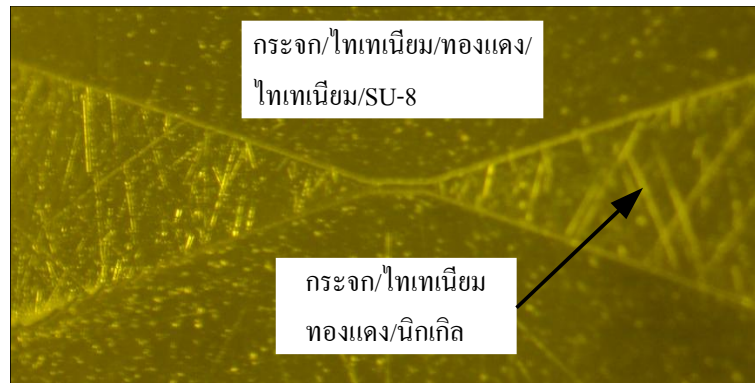
ผ้าขัดมัน DP Nap โดยใช้ผงขัดอะลูมินาขนาด $3\ \mu\text{m}$ และ $1\ \mu\text{m}$ ตามลำดับ จะได้ผิว निकิลและ SU-8 ที่เรียบมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.46 นำชิ้นงานที่ได้ไปต้มในน้ำยา remover PG ซึ่งสามารถสลายพันธะของ SU-8 ได้ เมื่อ SU-8 หลุดออกหมด ทำการ สกัดไทเทเนียม ทองแดง และไทเทเนียม ตามลำดับ จะได้แม่พิมพ์ निकิลบนแผ่นกระจกของช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.47 ล้างด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ตามด้วยอะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง สำหรับปัญหาที่พบในกระบวนการสร้างเหมือนกับของช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว



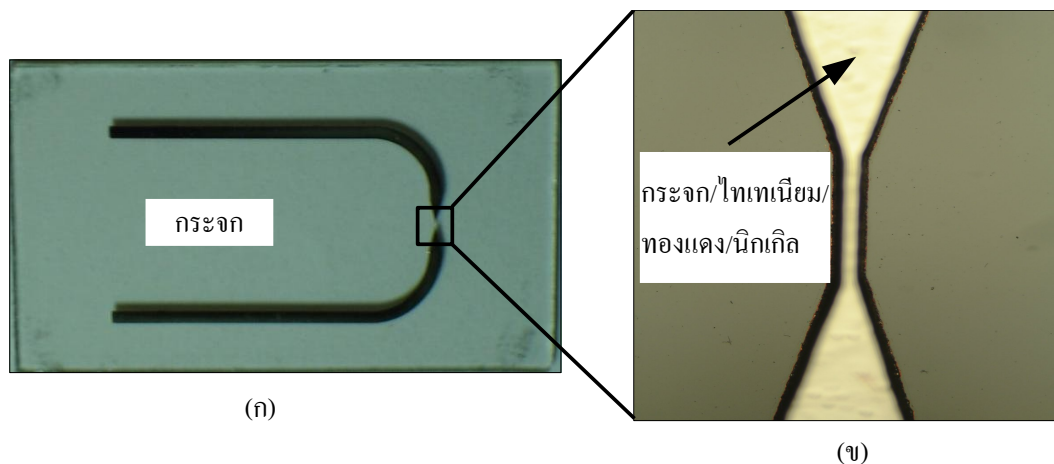
รูปที่ 4.44 มวล निकิล สิ้นจากแม่พิมพ์โครงสร้าง SU-8



รูปที่ 4.45 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1,200



รูปที่ 4.46 ภาพชิ้นงานที่ขัดด้วยผ้าขัด DP Nap

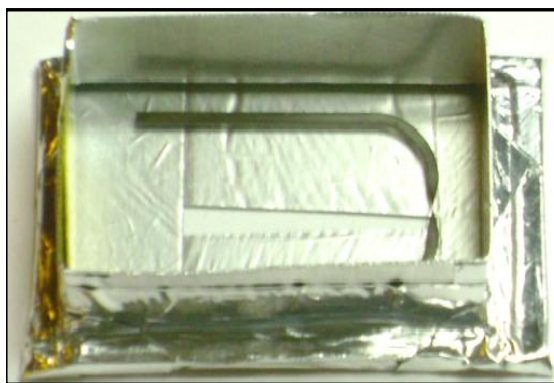


รูปที่ 4.47 ภาพชิ้นงานแม่พิมพ์นิกเกิลช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 2

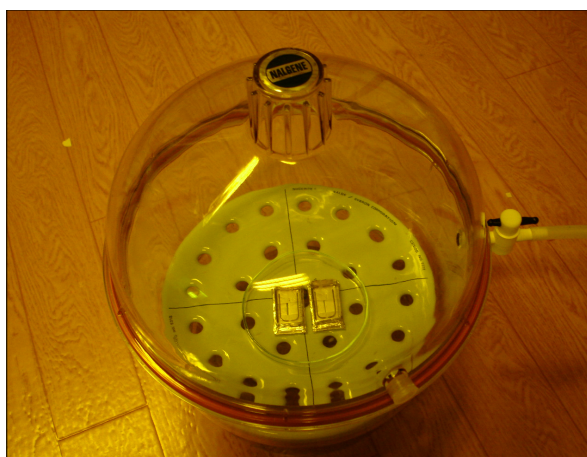
4.2.3.3 การผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS และการสร้างตัวตรวจรู้เพื่อให้ของเหลวและอนุภาคไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาคได้

การผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS เริ่มจากนำแม่พิมพ์นิกเกิลช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 2 มาทำบล็อกล้อมรอบทั้ง 4 ด้าน ด้วยแผ่น อะลูมิเนียม สูง ประมาณ 1 เซนติเมตร แล้วยึดด้วยเทปกาวเพื่อไม่ให้ของเหลวไหลออก แสดงดังรูปที่ 4.48 จากนั้นทำการเตรียมซิลิโคน PDMS โดยผสมส่วนที่ทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวกับส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ในอัตราส่วน 1 : 15 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากัน นำเข้าโถดูดความชื้น เพื่อดูดฟองอากาศออกจนหมด เสร็จแล้วเท PDMS ลงไปในแบบที่เตรียมไว้ โดยเทด้วยความระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศขึ้น นำเข้าโถดูดความชื้นอีกรอบนาน 30 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีฟองอากาศเหลืออยู่ แสดงดังรูปที่ 4.49 นำเข้าเตาอบเพื่อให้ซี

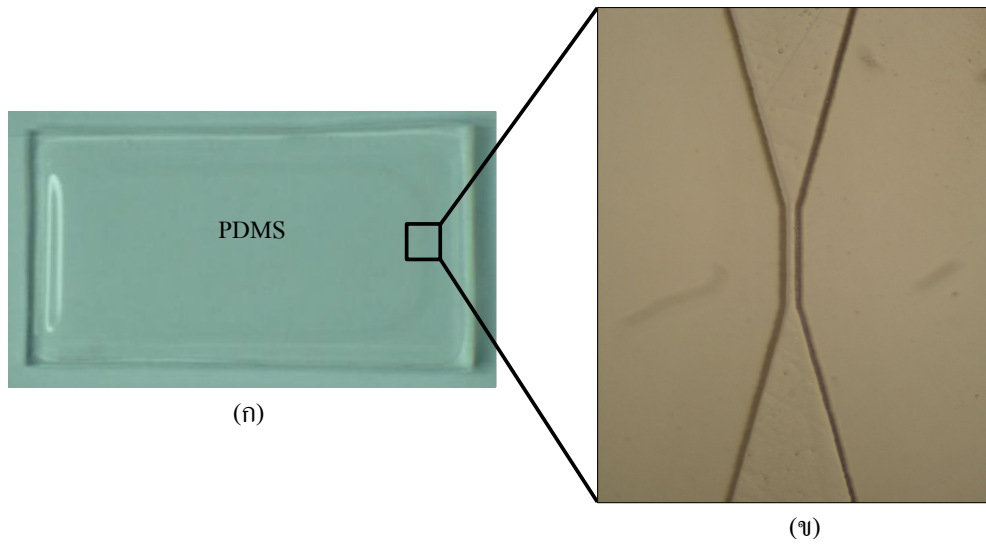
ลิโคน PDMS แข็งตัวเร็วขึ้น ที่อุณหภูมิ 90°C นาน 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นลอก ซิลิโคน PDMS ออกจากแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 4.50 นำช่องทางเดินจุลภาคที่ทำด้วยซิลิโคน PDMS ไปทำความสะอาด โดยล้างในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ อะซิโตน น้ำบริสุทธิ์ และเป่าให้แห้งด้วยแก๊ส ไนโตรเจน นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C นาน 30 นาที ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ขั้นตอน ต่อมาเป็นการบอนด์ระหว่างช่องทางเดินจุลภาคที่สร้างโดยใช้ซิลิโคน PDMS กับแผ่นกระจกที่มีทาง เข้า-ออกของของเหลวพร้อมทั้งขั้วอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อสร้างตัวตรวจรู้ให้สมบูรณ์ โดยกระบวนการบอนด์ เหมือนกับของช่องทางเดินจุลภาคบนแผ่นกระจกแบบที่ 1 เมื่อบอนด์เสร็จแล้วจะได้ตัวตรวจรู้ แสดง ดังรูปที่ 4.51 (ก) ตัวตรวจรู้ที่ทำการบอนด์เสร็จแล้ว (ข) ตัวตรวจรู้ที่ทำการเชื่อมต่อสายขั้วบริเวณทาง เข้า-ออกของของเหลวที่สามารถนำไปใช้ในการทดสอบ



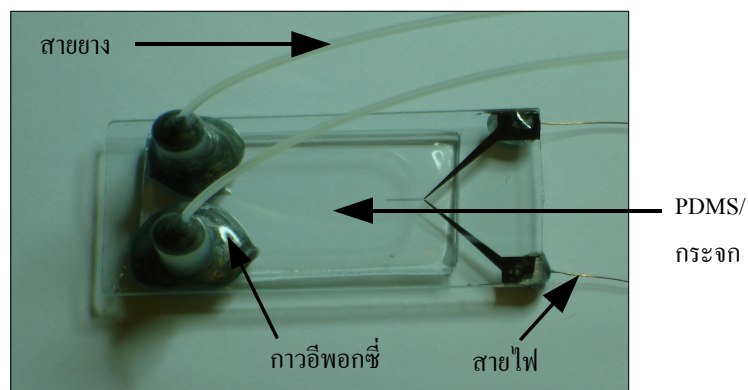
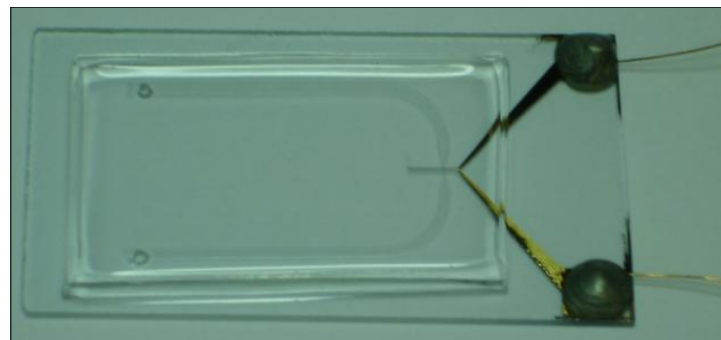
รูปที่ 4.48 ช่องทางเดินจุลภาคที่ล้อมรอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียม



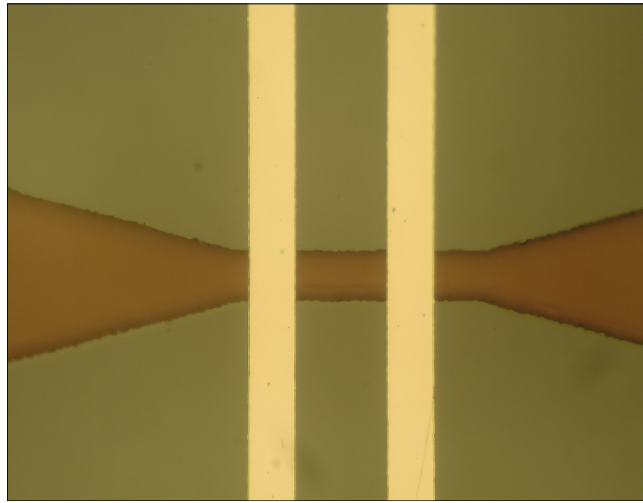
รูปที่ 4.49 นำ PDMS เข้าในโถดูดความชื้น



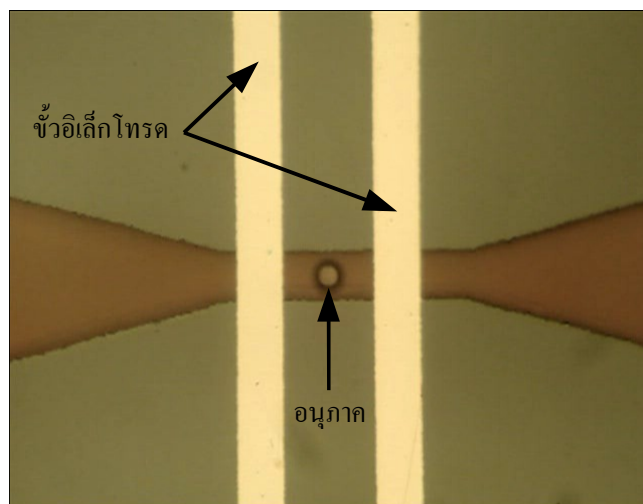
รูปที่ 4.50 PDMS ที่ลอกออกจากแบบแล้ว



รูปที่ 4.51 (ก) ช่องทางเดินจุลภาคที่ทำการบอนด์เรียบร้อยแล้ว (ข) ช่องทางเดินจุลภาคที่ทำการเชื่อมต่อสายยางบริเวณทางเข้า-ออกของของเหลวที่สามารถนำไปใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.52 ทดสอบการไหลของน้ำหมึกโดยไม่มีของเหลวซึมออกด้านข้าง



รูปที่ 4.53 ทดสอบการไหลของของเหลวและอนุภาคผ่านช่องทางเดินจุลภาค

จากนั้นนำช่องทางเดินจุลภาคที่ได้ไปทำการทดสอบการไหลของของเหลว โดยการทดสอบกับน้ำหมึกสีแดงให้ไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาค ผลที่ได้ของเหลวไม่สามารถซึมออกด้านข้างได้แสดงว่าช่องทางเดินจุลภาคสามารถใช้งานได้ แสดงดังรูปที่ 4.52 และนำมาทดสอบกับของเหลวที่มีอนุภาคผสมอยู่ให้ไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาค ปรากฏว่าอนุภาคสามารถไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาคได้ โดยอนุภาคเรียงตัวผ่านช่องทางเดินจุลภาคที่ละอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.53 ซึ่งช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 2 นี้สามารถแก้ปัญหาตรงที่อนุภาคติดผนังได้

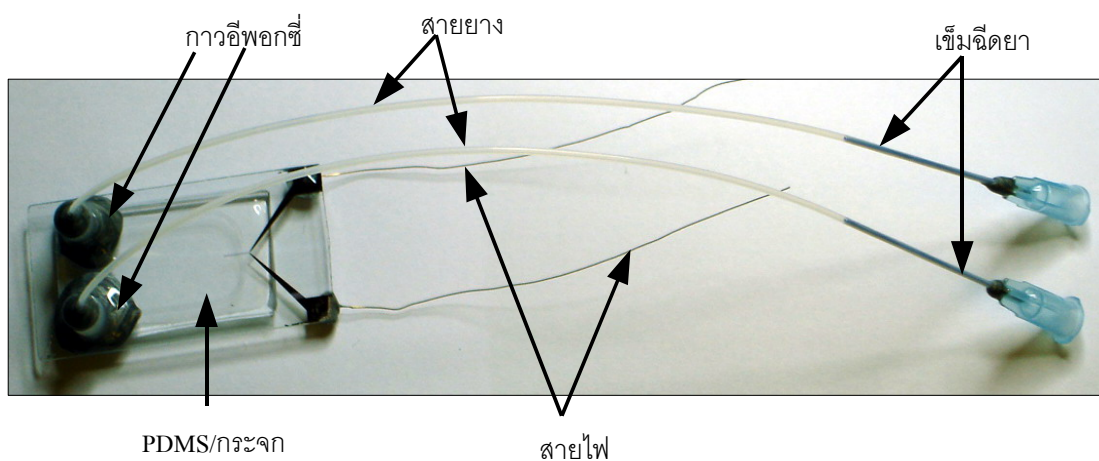
4.2.3.4 สรุป

การออกแบบและการสร้างตัวตรวจรู้ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ด้วยแม่พิมพ์นิกเกิลบนแผ่นกระจกแบบที่ 2 เหมือนกับช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 1 แตกต่างกันที่ ขั้วอิเล็กโทรดของช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 2 มีการชุบทองด้วยไฟฟ้าเพิ่มมาอีกชั้นหนึ่ง เพื่อให้ขั้วอิเล็กโทรดมีความแข็งแรงและสามารถนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น แม่พิมพ์ช่องทางเดินจุลภาคแบบที่ 2 นี้ สามารถให้ของเหลวและอนุภาคไหลผ่านได้ที่ละอนุภาค ซึ่งเหมาะสำหรับทำชุดตรวจนับจำนวนอนุภาค สำหรับขั้นตอนในการตรวจนับอนุภาคจะขอกล่าวรายละเอียดในบทต่อไป

บทที่ 5

ผลการทดสอบการนับจำนวนอนุภาคซึ่งแขวนลอยในสารละลาย

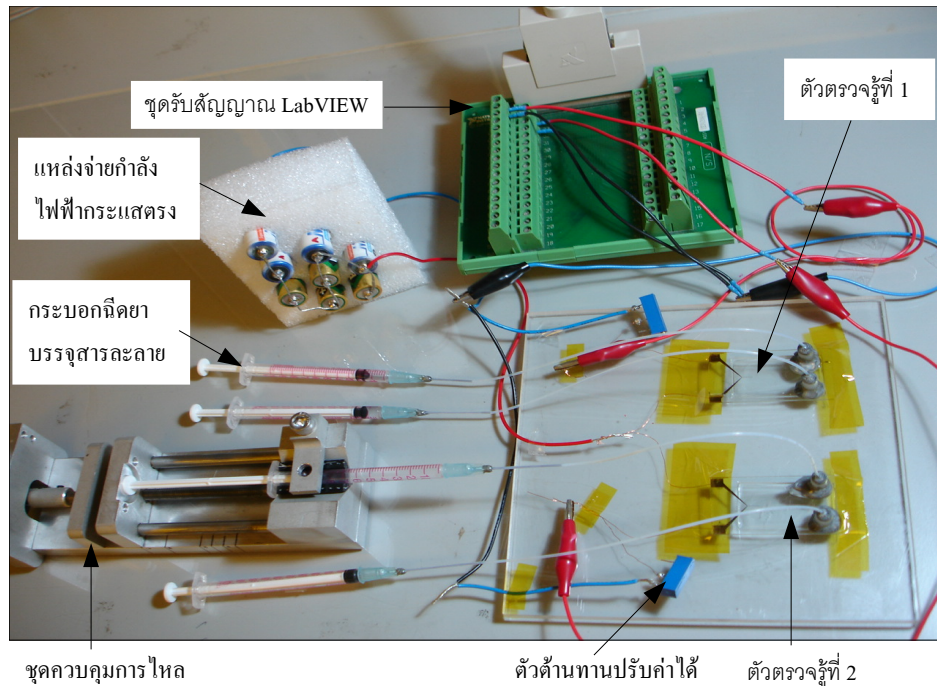
ในบทนี้จะทำการทดสอบการทำงานของตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้น ในการนับจำนวนอนุภาคของโพลีเมททาไคลเลท (polymethacrylate) ตัวตรวจรู้แสดงในรูปที่ 5.1 มีทางเข้า-ออกของของเหลวเพื่อให้ของเหลวและอนุภาคไหลผ่านช่องทางเดินจุลภาค ขนาดของช่องทางเดินจุลภาคมีความกว้าง $50\ \mu\text{m}$ ความยาว $140\ \mu\text{m}$ และความสูง $70\ \mu\text{m}$ อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง แต่ละเส้นมีความกว้าง $50\ \mu\text{m}$ วางห่างกัน $140\ \mu\text{m}$ อยู่ในบริเวณช่องทางเดินจุลภาคเพื่อใช้ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า



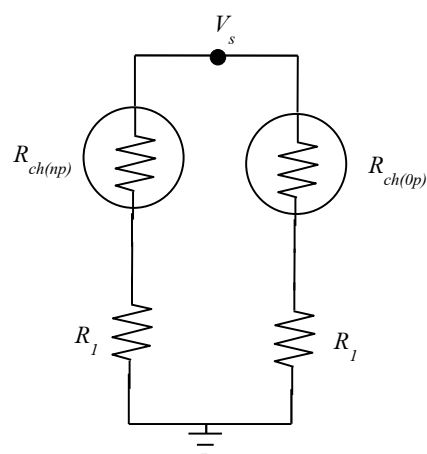
รูปที่ 5.1 ตัวตรวจรู้ที่ใช้ในการนับจำนวนอนุภาค

เพื่อทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในวงจรตรวจนับอนุภาค ชุดทดสอบจึงถูกจัดขึ้นเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า ในที่นี้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน จะไม่สามารถทราบได้จากการวัดด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สิ่งที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจึงถูกตรวจจับด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าแทน โดยใช้หลักการแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างช่องทางเดินจุลภาคของตัวตรวจรู้ ในขณะที่มีอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านช่องทางเดินจุลภาค ดังนั้นได้ทำชุดทดสอบในการนับจำนวนอนุภาคซึ่งแขวนลอยในสารละลายขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ประกอบด้วยชุดรับสัญญาณ LabVIEW เข้าสู่คอมพิวเตอร์ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ตัวต้านทานปรับค่าได้

ตัวตรวจรู้ที่ 1 มีสารละลายบรรจุอยู่ในช่องทางเดินจุลภาคตลอดการทดสอบและไม่มีการเคลื่อนที่ เนื่องจากอุปกรณ์ที่มีอยู่อย่างจำกัด ตัวตรวจรู้ที่ 2 มีการไหลของสารละลายและอนุภาคภายในช่องทางเดินจุลภาคด้วยอัตราการไหลคงที่ ด้วยชุดควบคุมอัตราการไหลที่มีเพียงชุดเดียว



รูปที่ 5.2 ชุดทดสอบตัวตรวจรู้ในการนับอนุภาค



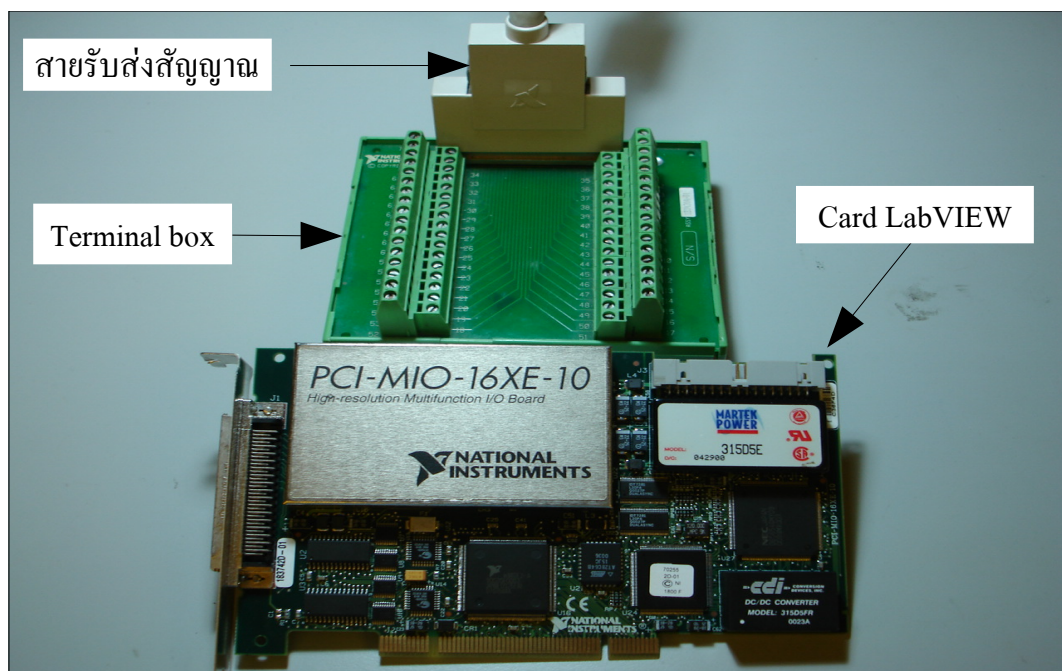
รูปที่ 5.3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของชุดตรวจนับอนุภาค

รูปที่ 5.3 วงจร สมมูลทางไฟฟ้าของชุดตรวจนับอนุภาค โดย V_s คือแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า กระแสตรง R_1 คือความต้านทานปรับค่าได้ $R_{ch(0p)}$ คือความต้านทานของตัวตรวจรู้ที่ 1 $R_{ch(np)}$ คือความต้านทานของตัวตรวจรู้ที่ 2 โดยพิจารณาที่ $n = 1, 2$ และ 3

ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีอนุภาคไหลผ่านบริเวณตรวจรู้ทางไฟฟ้า หาได้จากค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานปรับค่าได้ R_1 ของตัวตรวจรู้ที่ 1 ซึ่งไม่มีอนุภาค ไปด้วยค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานปรับค่าได้ R_1 ของตัวตรวจรู้ที่ 2 ที่มีอนุภาค เขียนแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.24) โดยความต้านทานปรับค่าได้ R_1 มีค่าเท่ากับ 250 k Ω ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีค่า 1.3 โวลต์ วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_1 จะใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อสัญญาณ Card LabVIEW ของ PCI-MIO-16XE-10 รุ่น NI-PCI-6030E, 16 inputs, 16-bits อัตราการชั่งตัวอย่างสูงสุด 100,000 ครั้งต่อวินาที มีความเที่ยงตรงสูงในการวิเคราะห์ข้อมูลของบริษัท National Instruments แสดงดังรูปที่ 5.4 ร่วมกันกับ โปรแกรม LabVIEW version 7.1 สามารถบันทึกข้อมูลได้ตลอดย่านการวัดและกำหนดอัตราการชั่งตัวอย่างของข้อมูลได้ รับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบแอนะล็อก มีพิสัยสูงสุด +/- 10 โวลต์ จากการทดลองรับเอาที่พูดแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงจากวงจรไฟฟ้าทางพอร์ต AI 0 กับกราวด์ (GND) และทางพอร์ต AI 1 กับกราวด์ (GND) แรงดันที่วัดได้จากโปรแกรม LabVIEW ใช้อัตราการชั่งตัวอย่าง 50,000 ครั้งต่อวินาที ตลอดการทดลอง ข้อมูลที่ได้จะจัดเก็บในคอมพิวเตอร์ ใช้สมการ (3.24) ในการวิเคราะห์ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการนับจำนวนอนุภาค ทำการวิเคราะห์ผลแบบไม่ต่อเนื่อง (off-line) อนุภาคที่ใช้ในการทดสอบ คือ อนุภาคโพลีเมทราไคเลท (polymethacrylate) ขนาดมาตรฐานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 μm (Fluka Chemie, Sigma-Aldrich Inc.) มี solid content 10% ของที่ซื้อมา บรรจุในขวดปริมาตร 10 ml ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ใช้สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.01 M เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตลอดการทดลอง

จากการทดลองวัดค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาคที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์บรรจุอยู่ด้วยเครื่องมือวัดความต้านทาน (digital multimeter) ได้ค่า 250 k Ω ค่าความต้านทานที่ได้นำไปใช้ในการคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ρ_w) จากความสัมพันธ์ที่ว่า $R = \rho L/A$ และทำการวัดค่าความต้านทานขณะอนุภาคอยู่นิ่ง กรณีที่อยู่ในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค มีค่าความต้านทาน 261.73 k Ω ดังแสดงในรูปที่ 5.6 กรณีที่อยู่ในช่องทางเดินจุลภาคมี 2 อนุภาค มีค่าความต้านทาน 274.05 k Ω ดังแสดงในรูปที่ 5.7 และภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 3 อนุภาค มีค่าความต้านทาน 286.18 k Ω ดังแสดงในรูปที่ 5.8 จากนั้นทำการคำนวณค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาคตามทฤษฎีของแมกซ์เวลล์ เมื่อภายในช่องทางเดินจุลภาคมี 1 อนุภาค จากสมการที่ (3.5) ได้ค่าความต้านทาน 275.65 k Ω คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 5.32% กรณีที่อยู่ในช่องทางเดินจุลภาคมี 2 อนุภาค จากสมการที่ (3.11) ได้ค่าความต้านทาน 301.29 k Ω คิดเป็น

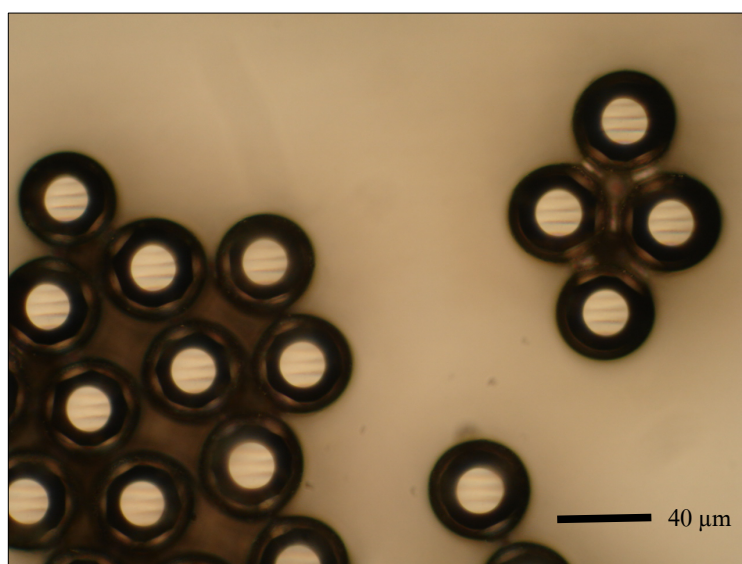
เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 9.94% และภายในช่องทางเดินจูลภาคมี 3 อนุภาค จากสมการที่ (3.15) ได้ค่าความต้านทาน $326.94 \text{ k}\Omega$ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 14.24% เมื่อทำการคำนวณค่าความต้านทานช่องทางเดินจูลภาคด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้า โดยใช้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของอนุภาค (ρ_p) เฉลี่ย ซึ่งมีค่าเท่ากับ $9.353 \Omega \cdot m$ ในการคำนวณ กรณีที่อยู่ในช่องทางเดินจูลภาคมี 1 อนุภาค ได้ค่าความต้านทาน $263.20 \text{ k}\Omega$ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 0.56% กรณีที่อยู่ในช่องทางเดินจูลภาคมี 2 อนุภาค ได้ค่าความต้านทาน $276.04 \text{ k}\Omega$ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 0.73% และกรณีที่ภายในช่องทางเดินจูลภาคมี 3 อนุภาค ได้ค่าความต้านทาน $288.56 \text{ k}\Omega$ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 0.83% ซึ่งสรุปเป็นค่าความต้านทานต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 5.1 พบว่าค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีของแมกซ์เวลล์นั้น มีค่าความผิดพลาดมากกว่าค่าความต้านทานที่คำนวณได้จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่จำลองขึ้น



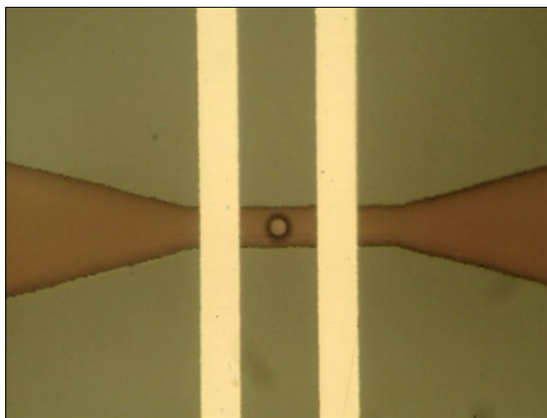
รูปที่ 5.4 ชุดรับสัญญาณของ LabVIEW

ตารางที่ 5.1 ค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาคเมื่ออนุภาคอยู่ภายใน

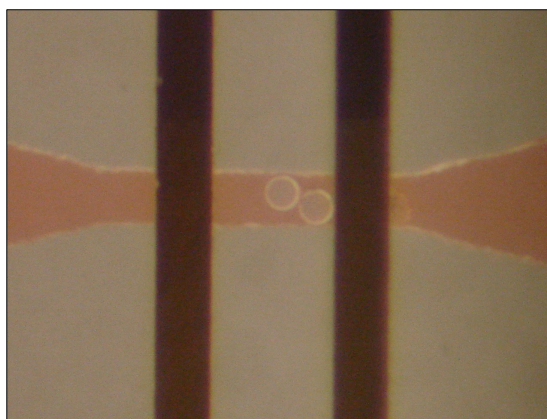
จำนวนอนุภาค	จากการทดลอง		จากการประมาณค่าด้วยสภาพต้านทานไฟฟ้ารวมของ Maxwell			จากการประมาณความต้านทานของตัวตรวจรู้ด้วยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ารวม		
	ค่าความต้านทานเฉลี่ย (kΩ)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าความต้านทาน (kΩ)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อน (%)	ค่าความต้านทาน (kΩ)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	261.73	5.81	275.65	5.66	5.32	263.20	4.73	0.56
2	274.05	7.12	301.29	6.02	9.94	276.04	5.91	0.73
3	286.18	8.69	326.94	7.84	14.24	288.56	6.35	0.83



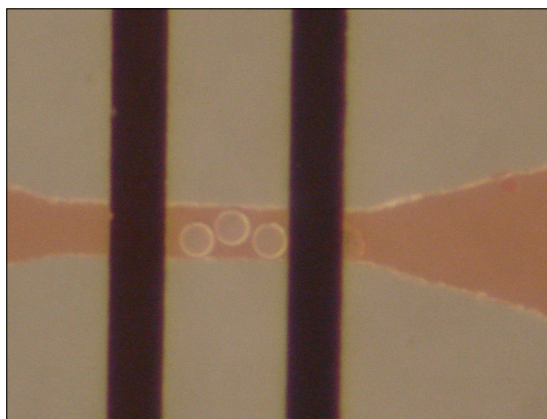
รูปที่ 5.5 อนุภาคโพลีเมทราไคเลทเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 μm



รูปที่ 5.6 ภายในช่องทางเดินจุดภาคมี 1 อนุภาค ค่าความต้านทาน $261.73 \text{ k}\Omega$



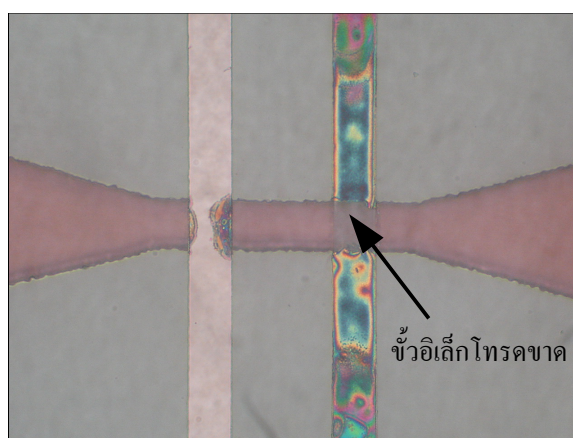
รูปที่ 5.7 ภายในช่องทางเดินจุดภาคมี 2 อนุภาค ค่าความต้านทาน $274.05 \text{ k}\Omega$



รูปที่ 5.8 ภายในช่องทางเดินจุดภาคมี 3 อนุภาค ค่าความต้านทาน $286.18 \text{ k}\Omega$

5.1 การทดลองนับจำนวนอนุภาคโพลีเมทราไคลเลท

ได้ทำชุดทดสอบการทำงานของตัวตรวจรู้ในการนับจำนวนอนุภาคโพลีเมทราไคลเลทขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ในการทดลองได้เตรียมสารละลาย KCl เข้มข้น 0.01 M ปริมาตรหนึ่ง เพื่อใช้ตลอดการทดลอง โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 กรณี แต่ละกรณีใช้สารละลาย KCl ปริมาตร 0.5 ml ใช้อัตราการไหลคงที่ที่ $0.9 \mu\text{l/s}$ ในการทดลอง กรณีที่ 1 ใช้สารละลาย KCl ปริมาตร 0.5 ml เพียงอย่างเดียว ในกรณีที่ 2 ใช้สารละลาย KCl ปริมาตร 0.5 ml ผสมกับอนุภาคโพลีเมทราไคลเลท ปริมาตร $2.5 \mu\text{l}$ คิดเป็นจำนวนอนุภาคทั้งหมดประมาณ 6,275 อนุภาค ที่กระจายตัวสม่ำเสมอในสารละลาย หรือ 22 อนุภาค/ $1.8 \mu\text{l}$ กรณีที่ 3 ใช้สารละลาย KCl ปริมาตร 0.5 ml ผสมกับอนุภาคโพลีเมทราไคลเลท ปริมาตร $5 \mu\text{l}$ คิดเป็นจำนวนอนุภาคทั้งหมดประมาณ 12,550 อนุภาค ที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในสารละลาย หรือ 44 อนุภาค/ $1.8 \mu\text{l}$ และ กรณีที่ 4 ใช้สารละลาย KCl ปริมาตร 0.5 ml ผสมกับอนุภาค โพลีเมทราไคลเลท ปริมาตร $7.5 \mu\text{l}$ คิดเป็นจำนวนอนุภาคทั้งหมดประมาณ 18,825 อนุภาคที่กระจายตัวสม่ำเสมอในสารละลาย หรือ 66 อนุภาค/ $1.8 \mu\text{l}$ ในการวัดผลจะวัดค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_1 ของตัวตรวจรู้ทั้งสอง ดังรูปที่ 5.3 และบันทึกผลพร้อมกันในเวลาเดียวกัน แรงดันที่ใช้กับชุดทดสอบ คือ 1.3 โวลต์ ถ้าใช้แรงดันมากกว่านี้จะทำให้ขั้วอิเล็กโทรดขาด ดังแสดงในรูปที่ 5.9 และจากการทดลองก่อนหน้านี้ ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงช่องทางเดินเดียวที่มีอนุภาคผ่านไม่สามารถวิเคราะห์การนับจำนวนอนุภาคได้ จึงได้เปลี่ยนเป็นการวัดผลทั้งสองช่องทางเดินจุลภาคพร้อมกันด้วยโปรแกรม LabVIEW เพื่อลดปัญหาด้านสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นและนำไปวิเคราะห์หาค่าด้วยโปรแกรม MATLAB สามารถทำการนับจำนวนอนุภาคได้ ดังที่จะกล่าวในรายละเอียดต่อไป



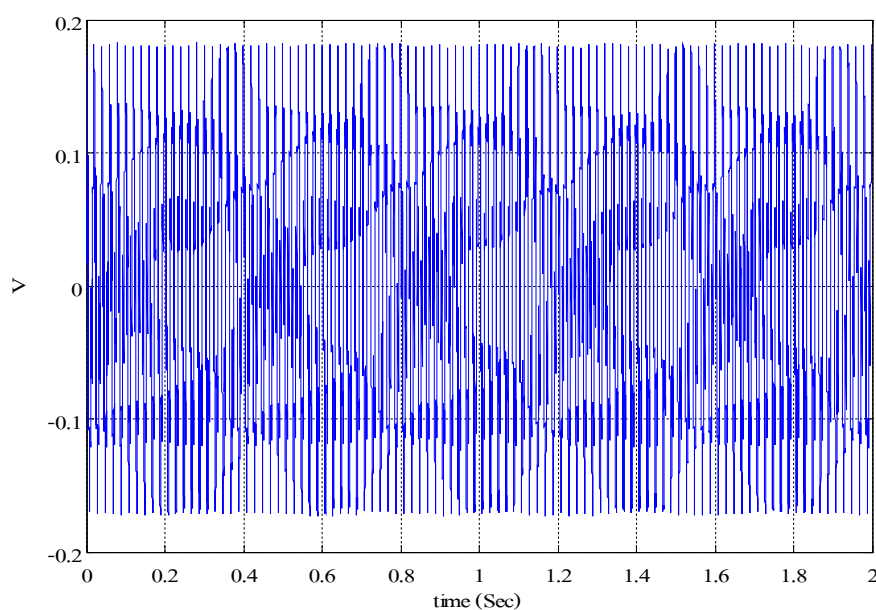
รูปที่ 5.9 ขั้วอิเล็กโทรดขาดเนื่องจากการจ่ายแรงดันเกิน 1.3 โวลต์

5.2 ผลการนับจำนวนอนุภาคโพลีเมทราโคลเลท

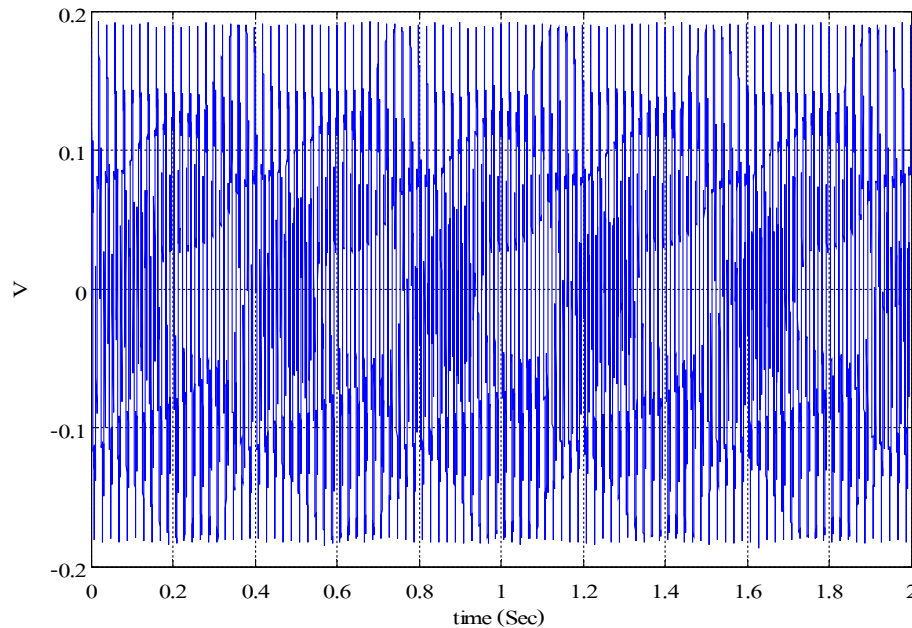
ในการนับจำนวนอนุภาคโพลีเมทราโคลเลท ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 กรณี เพื่อพิสูจน์ผลการนับจำนวนอนุภาค โดยแต่ละกรณีบรรจุสารละลายปริมาตร 0.5 ml ลงในกระบอกฉีดยา แล้วปล่อยให้ไหลด้วยอัตราเร็วคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที 40 วินาที คิดเป็นปริมาตรที่ของเหลวไหลไปตามสายยางจนถึงหัวอิเล็กโทรด 0.9 ml และเริ่มบันทึกผลการทดลองด้วย LabVIEW เมื่อเวลาผ่านไป 2 นาทีจากเริ่มไหล จนสารละลายที่บรรจุในกระบอกฉีดยาหมด คิดเป็นเวลาทั้งหมด 7 นาที 16 วินาที ได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นช่วงเวลาระยะ 2 วินาที โดยคิดเป็นจำนวนทั้งหมด 218 ช่วงเวลาต่อครั้ง ดังรายละเอียดการวิเคราะห์ที่จะกล่าวต่อไป

5.2.1 ผลการนับจำนวนอนุภาค กรณีที่ 1

ผลการนับจำนวนอนุภาค โดยที่ยังไม่มีอนุภาคผสมอยู่ในสารละลาย KCl ปริมาตร 0.5 ml ของตัวตรวจรู้ที่ 2 ขณะที่ตัวตรวจรู้ที่ 1 บรรจุสารละลาย KCl เพียงอย่างเดียวเหมือนกันทุกกรณีของการทดลอง จากผลการทดลองที่ได้ นำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมแสดงดังในภาคผนวก ฉ โดยค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่ 1 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.10 เป็นกราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0-2 วินาที ซึ่งผลที่ได้นี้ใช้เป็นผลอ้างอิงในขณะที่ไม่มีอนุภาคผ่าน และผลการทดลองของตัวตรวจรู้ที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 5.11



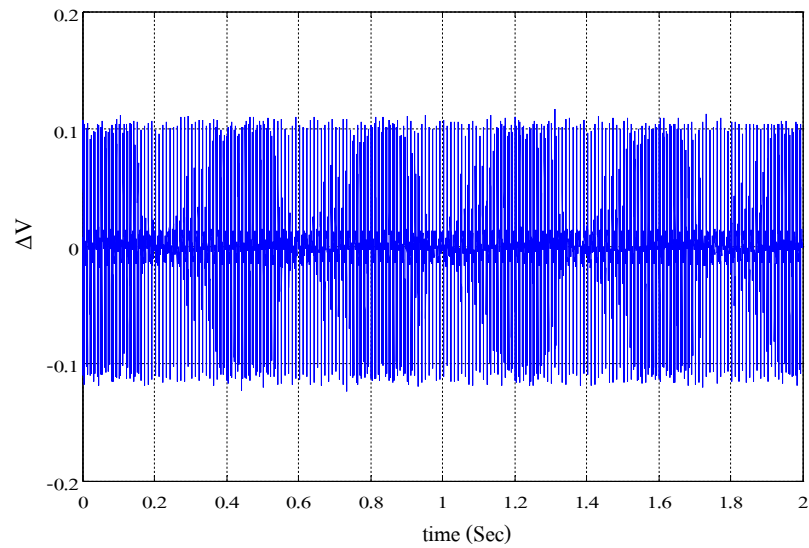
รูปที่ 5.10 กราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0-2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 1



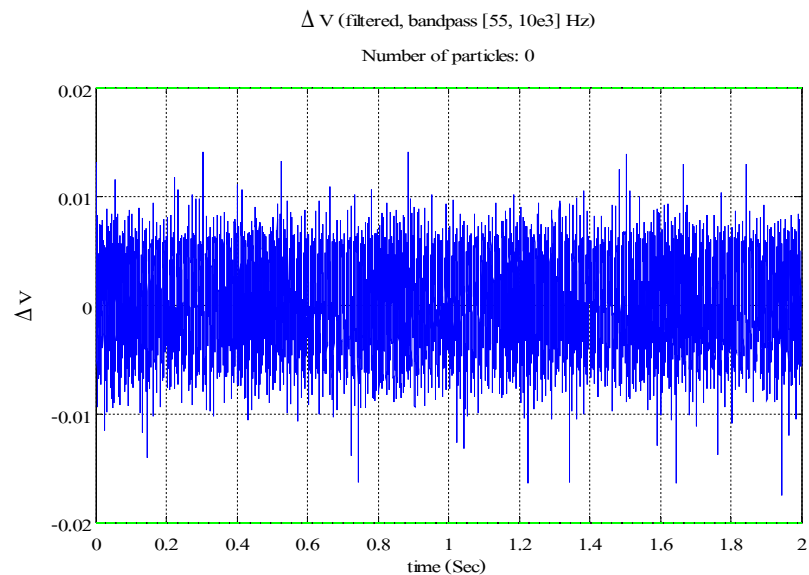
รูปที่ 5.11 กราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา
พิจารณาในช่วง 0–2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 2

จากการทดลองทราบว่า เมื่ออนุภาคอยู่ในช่องทางเดินจุลภาคค่าความต้านทานที่วัดได้จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าแรงดันเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจึงนำข้อมูลทั้งสองไปหาผลต่างของแรงดันที่เกิดขึ้นโดยนำผลการทดลองของตัวตรวจรู้ที่ 1 ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงตอนที่ไม่มีอนุภาคบรรจุอยู่ไปลบออกจากผลการทดลองของตัวตรวจรู้ที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงดังรูปที่ 5.12 จากกราฟที่ได้ยังไม่สามารถวิเคราะห์หาจำนวนอนุภาคได้ จึงนำข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวกรองสัญญาณ โดยตัวกรองส่วนมากเกี่ยวข้องกับการกำจัดสัญญาณรบกวน (noise) และทำการลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ตัวกรองนิยมนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีวิธีการออกแบบที่ง่ายแต่ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวกรองมีคุณสมบัติ คือ จะยอมให้สัญญาณความถี่ที่ต้องการผ่าน และจะกำจัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการออก ดังนั้นจึงได้นำตัวกรองผ่านแถบความถี่ (Band Pass Filter) แบบ Butterworth ในโปรแกรม MATLAB มาทำการวิเคราะห์ โดยทำการกรองสัญญาณรบกวนที่ยอมให้ช่วงความถี่ 55 Hz-10 kHz ผ่าน เหตุผลที่เลือกช่วงความถี่ดังกล่าว เนื่องจากการทดลองได้ทำการเลือกช่วงความถี่ต่าง ๆ มาทำการกรองสัญญาณผลต่างของแรงดัน ตอนที่ไม่มีอนุภาค และตอนที่ไม่มีอนุภาคสามารถวิเคราะห์ได้ว่าช่วงใดน่าจะเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุด และจากการทดสอบผลการทดลองทั้งหมดพบว่าช่วงความถี่ดังกล่าวเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุด ที่ควรนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป จากการเก็บข้อมูลและทำการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 5.13 จากการวิเคราะห์ข้อมูลในรูปที่ 5.13 พบว่าผลต่างของแรงดันสูงสุด คือ 0.020 โวลต์ และต่ำสุด คือ -0.020 โวลต์ เป็นค่าอ้างอิงใน

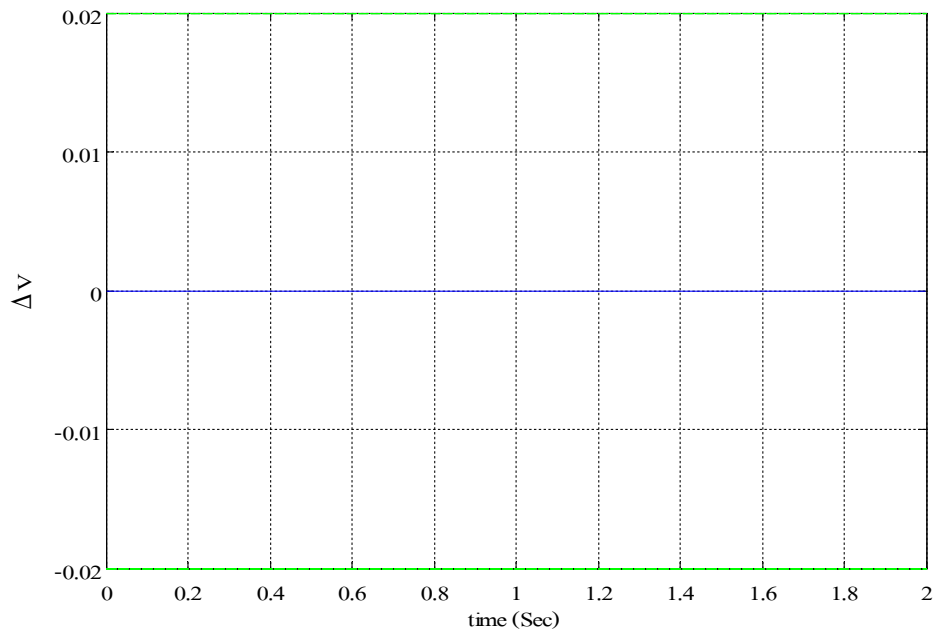
การกำจัดสัญญาณรบกวนที่ไม่สามารถกรองได้หมด เมื่อใช้ค่าอ้างอิงนี้ในการวิเคราะห์ผลจะได้ว่าไม่มีจำนวนอนุภาคอยู่เลย ซึ่งตรงกับความเป็นจริงเนื่องจากไม่ได้ทำการผสมอนุภาคลงในสารละลายเลย ดังแสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.12 กราฟผลต่างของแรงดันกับเวลาของตัวตรวจวัดที่ 1 กับตัวตรวจวัดที่ 2



รูปที่ 5.13 กราฟผลต่างของแรงดันเมื่อผ่านการกรองสัญญาณในช่วงความถี่ 55 Hz-10 kHz ผ่าน

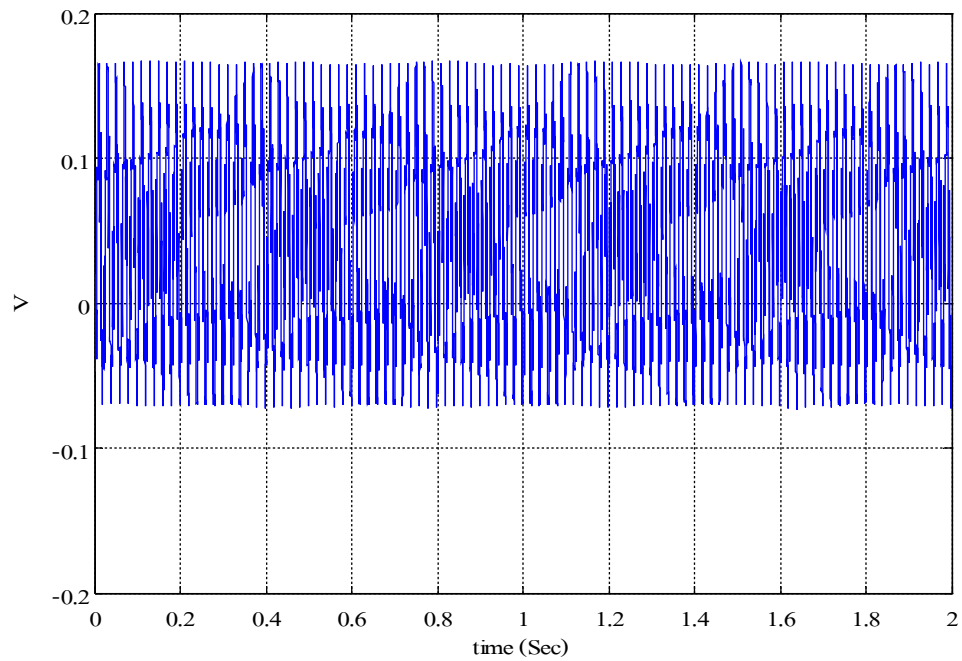


รูปที่ 5.14 ผลการนับจำนวนอนุภาคเป็นศูนย์

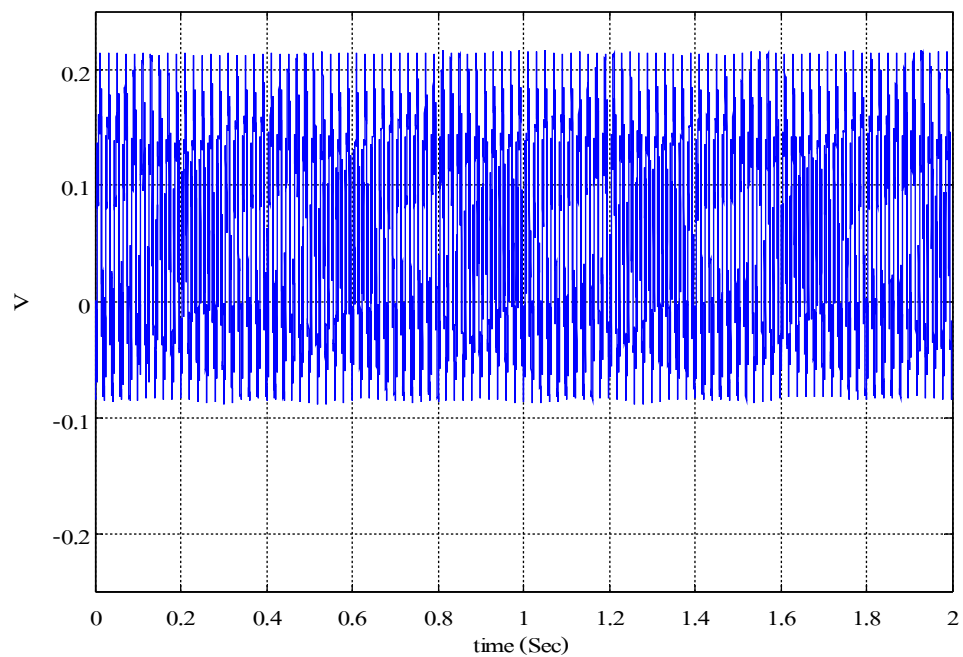
จากผลการทดลองของกรณีศึกษาที่ 1 ทำให้ทราบข้อมูลที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์จำนวนอนุภาค โดยได้เงื่อนไขของการกรองสัญญาณรบกวน และเงื่อนไขของการตัดสัญญาณที่ไม่สามารถกรองได้หมด เพื่อนำไปใช้กับการทดลองกรณีศึกษาที่ 2 กรณีศึกษาที่ 3 และกรณีศึกษาที่ 4 ในการวิเคราะห์จำนวนอนุภาคต่อไป

5.2.2 ผลการนับจำนวนอนุภาค กรณีศึกษาที่ 2

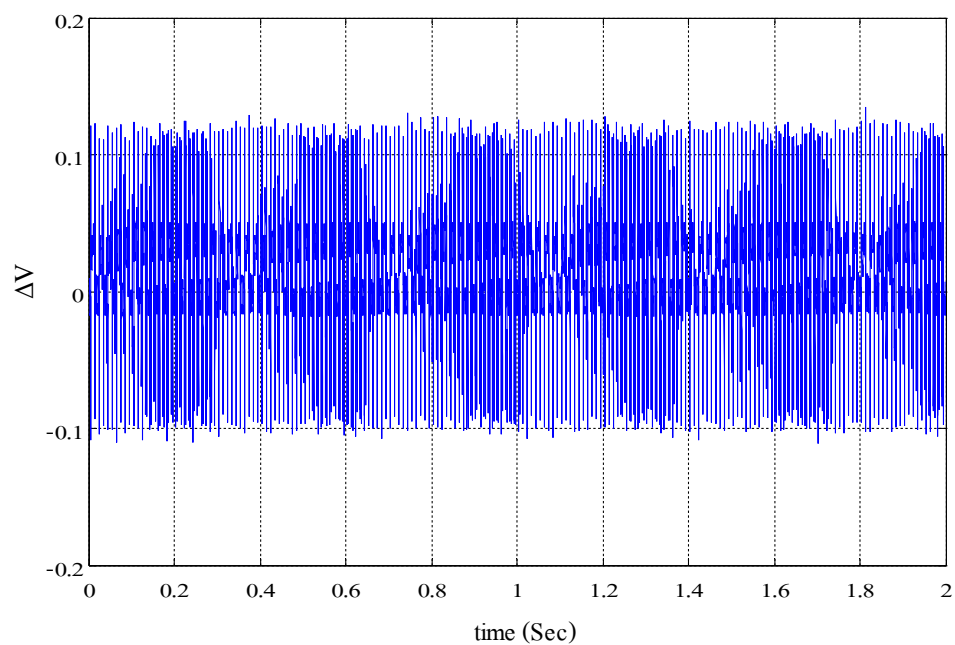
จากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่ 1 ได้ผลดังรูปที่ 5.15 กราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0–2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 1 ค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่ 2 ได้ผลดังรูปที่ 5.16 กราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0–2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 2 จากนั้นนำไปหาผลต่างของแรงดันไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์จำนวนอนุภาค รูปที่ 5.17 กราฟผลต่างของแรงดันกับเวลาของตัวตรวจรู้ที่ 1 กับตัวตรวจรู้ที่ 2 นำกราฟที่ได้ไปทำการกรองสัญญาณที่ความถี่เหมือนกรณีศึกษาที่ 1 ได้ดังรูปที่ 5.18 จากนั้นทำการนับจำนวนอนุภาค โดยทำการทดลองนับจำนวนอนุภาคที่ระดับแรงดันต่าง ๆ เพื่อดูว่าระดับแรงดันใดเป็นค่าที่ควรใช้เป็นแรงดันอ้างอิงในการนับจำนวนอนุภาค โดยทำการทดลองนับจำนวนอนุภาคที่ระดับแรงดันอ้างอิงตั้งแต่ค่า ± 0.02 โวลต์ ถึง ± 0.036 โวลต์ โดยเพิ่มขึ้นทีละ ± 0.002 โวลต์ ได้ผลการนับอนุภาคที่ระดับอ้างอิงต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.2 และสามารถเขียนกราฟที่ระดับแรงดันอ้างอิง ± 0.026 โวลต์ ได้ดังรูปที่ 5.19



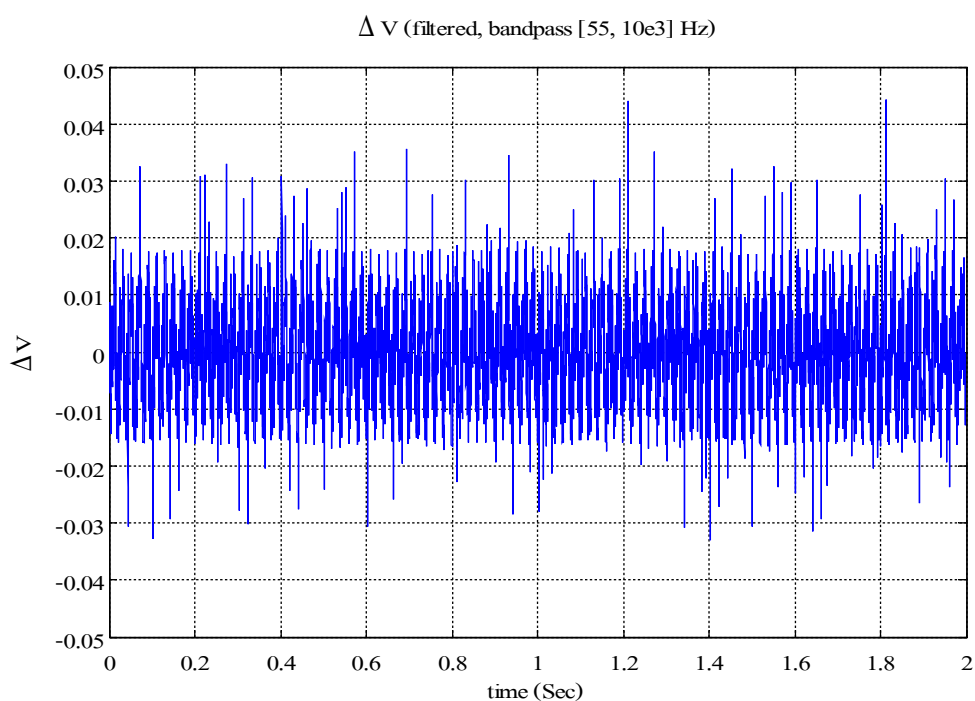
รูปที่ 5.15 กราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา
พิจารณาในช่วง 0–2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 1



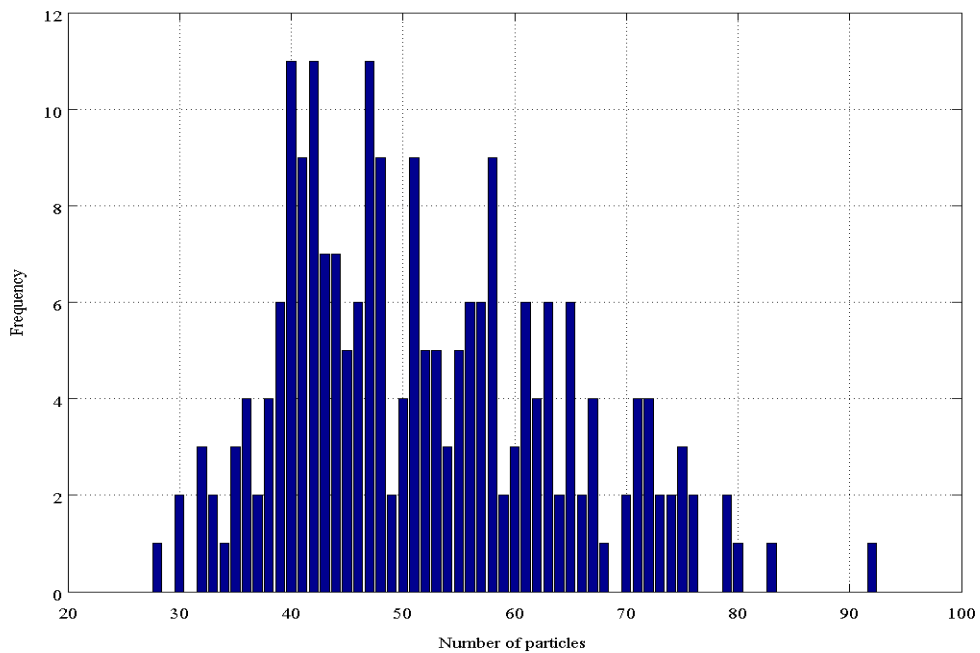
รูปที่ 5.16 กราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา
พิจารณาในช่วง 0–2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 2



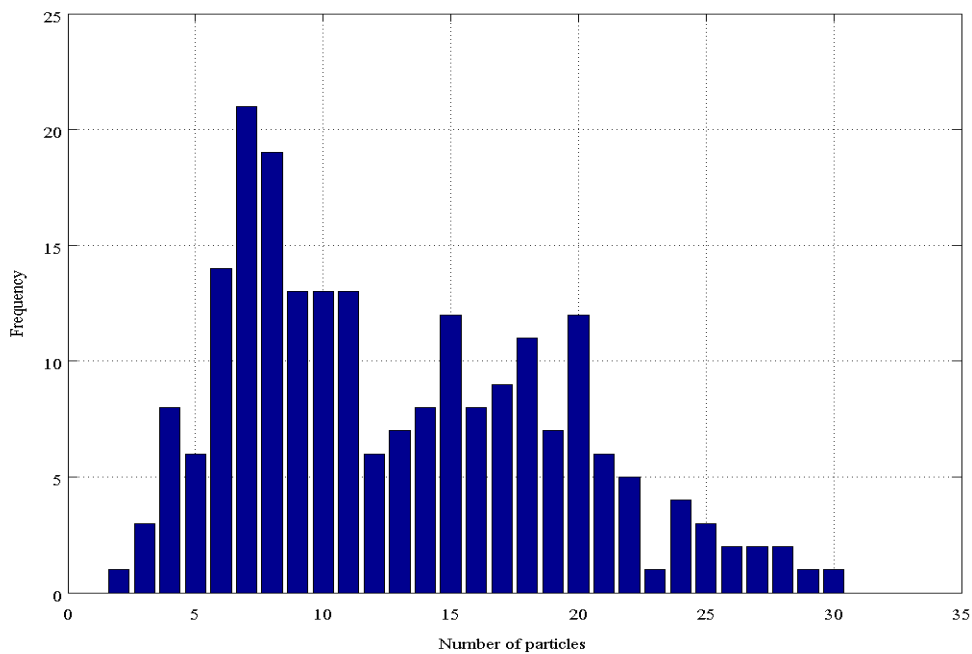
รูปที่ 5.17 กราฟผลต่างของแรงดันกับเวลา ของตัวตรวจรู้ที่ 1 กับตัวตรวจรู้ที่ 2



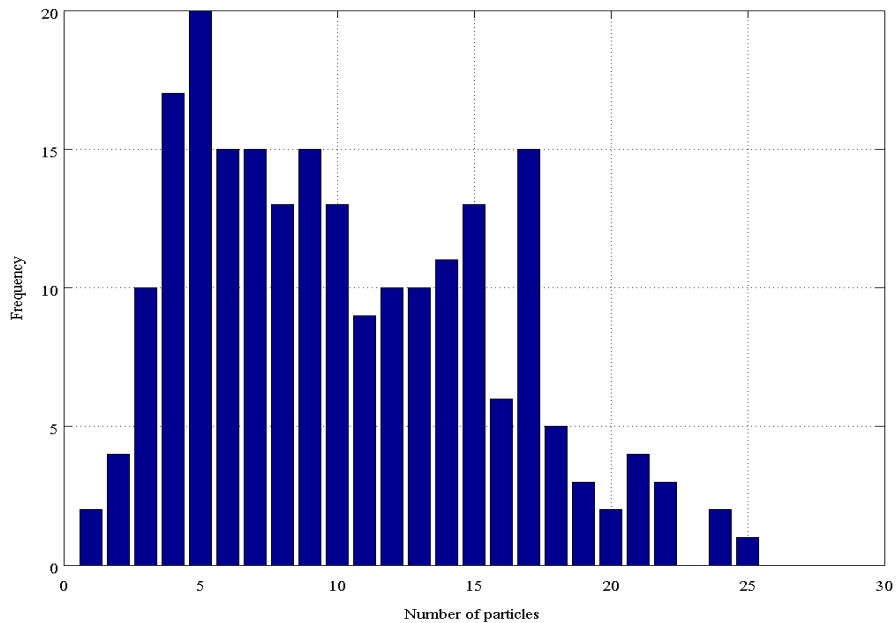
รูปที่ 5.18 กราฟผลต่างของแรงดันเมื่อผ่านการกรองสัญญาณในช่วงความถี่ 55 Hz – 10 kHz ผ่าน



รูปที่ 5.19 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.026 โวลต์



รูปที่ 5.20 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.030 โวลต์

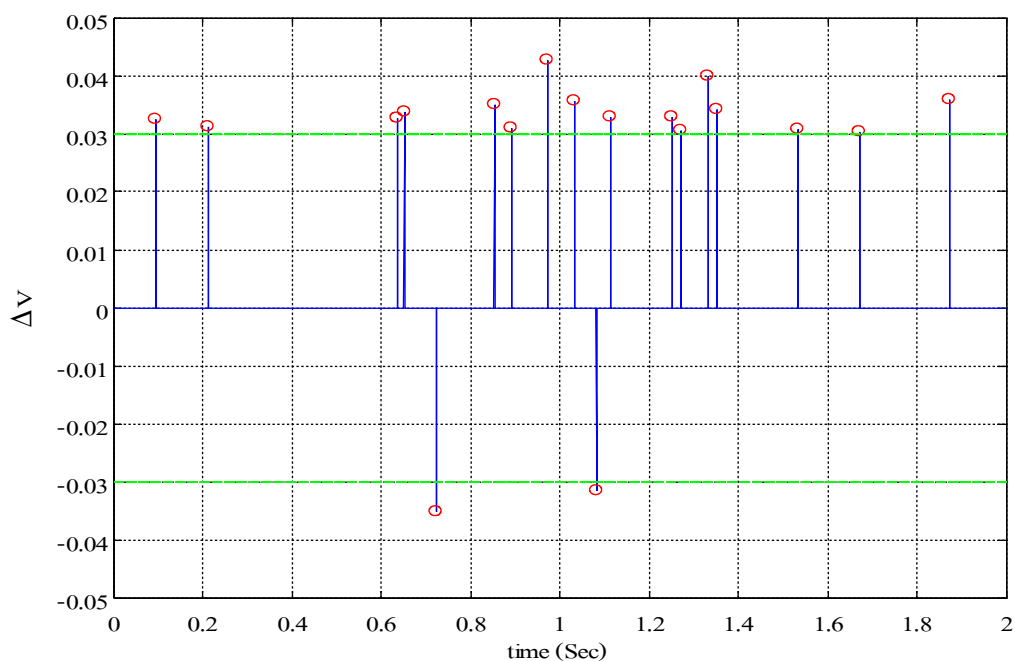


รูปที่ 5.21 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.036 โวลต์

จากตารางค่าระดับแรงดันอ้างอิงที่ทำการนับจำนวนอนุภาคได้ใกล้เคียงจากที่คำนวณได้ คือที่ระดับอ้างอิง ± 0.030 โวลต์ เมื่อทำการนับจำนวนอนุภาคนับได้เฉลี่ยที่ 18 อนุภาค/ $1.8 \mu\text{l}$ จากผลการนับตลอด 218 ช่วงเวลา ดังรูปที่ 5.22 ในการทดลองนับอนุภาคแต่ละครั้ง ซึ่งจากการคำนวณค่าอนุภาคได้ 22 อนุภาค/ $1.8 \mu\text{l}$ ผลจากผลการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ภายได้เงื่อนไขเดียวกัน ยังไม่เพียงพอที่จะสามารถยืนยันได้ว่า ชุดนับอนุภาคของตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นถูกต้อง จึงทำการทดสอบนับจำนวนอนุภาคโดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของอนุภาค ดังที่จะกล่าวต่อไป ในผลการนับจำนวนอนุภาค กรณีที่ 3

ตารางที่ 5.2 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 22 อนุภาค/1.8 μ l

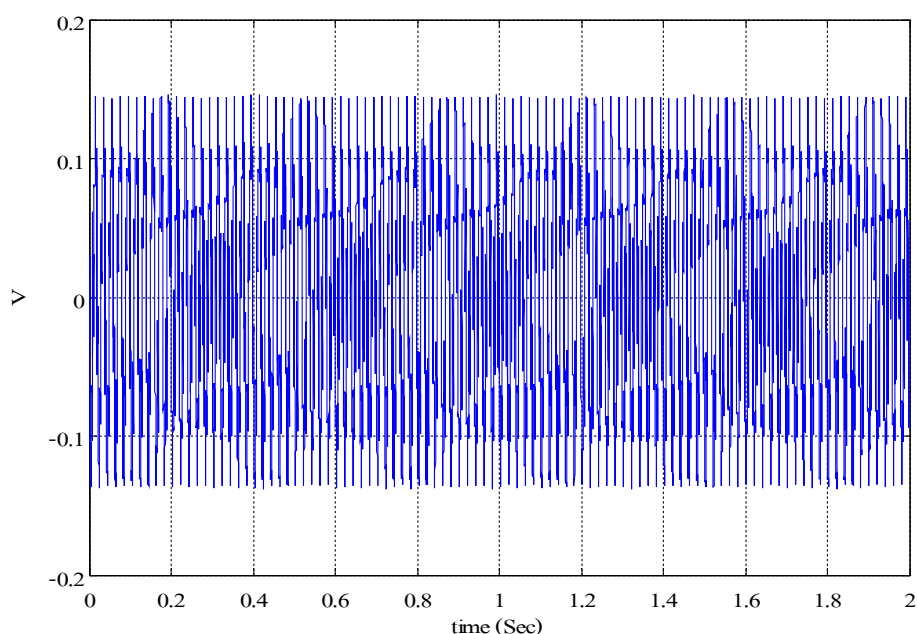
ระดับแรงดัน อ้างอิง (โวลต์)	จำนวนอนุภาค จากการคำนวณ ในเวลา 2 วินาที	จำนวนอนุภาค เฉลี่ยในเวลา 2 วินาที	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	จำนวนอนุภาค ทั้งหมดที่นับได้
+/- 0.020	22	65	37.59	14,170
+/- 0.022	22	62	33.71	13,516
+/- 0.024	22	58	28.15	12,644
+/- 0.026	22	56	22.54	12,208
+/- 0.028	22	29	17.79	6,322
+/- 0.030	22	18	7.26	3,924
+/- 0.032	22	8	5.81	1,744
+/- 0.034	22	7	5.32	1,526
+/- 0.036	22	5	4.85	1,090



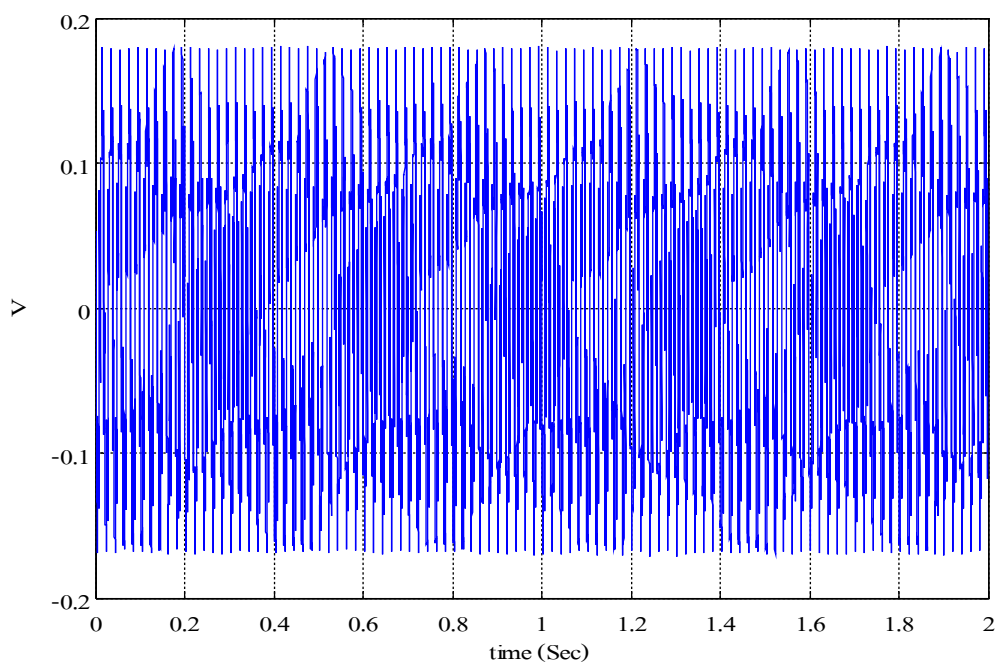
รูปที่ 5.22 ผลการนับอนุภาคได้ 18 อนุภาค/1.8 μ l

5.2.3 ผลการนับจำนวนอนุภาค กรณีที่ 3

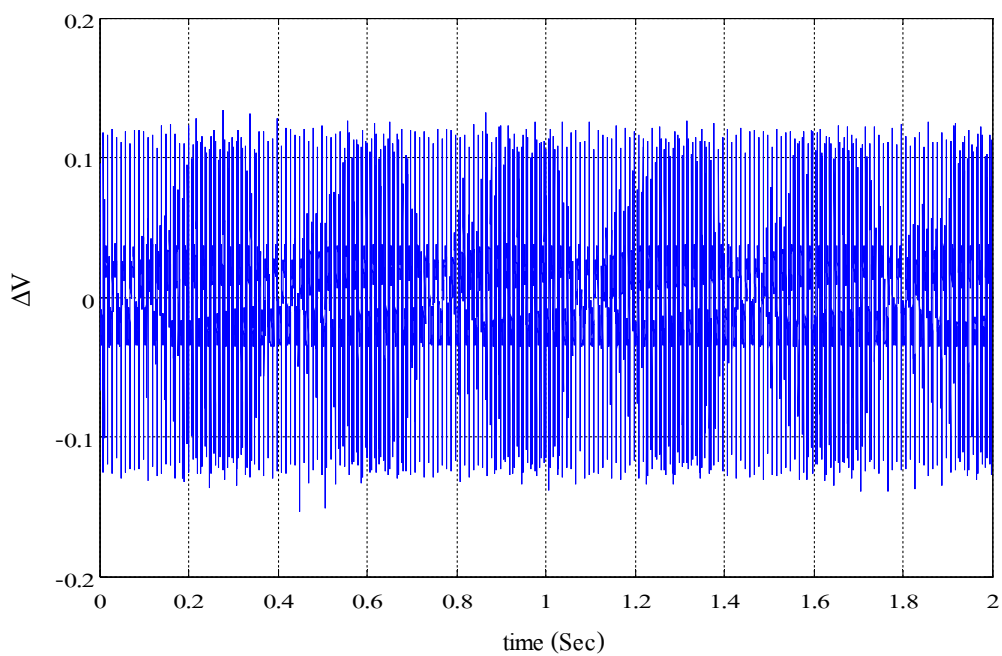
ทำการทดลองเหมือนการนับจำนวนอนุภาค กรณีที่ 2 ค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่ 1 ได้ผลดังรูปที่ 5.23 กราฟผลตอบแทนของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0–2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 1 ค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่ 2 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.24 กราฟผลตอบแทนของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0–2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 2 จากนั้นนำไปหาผลต่างของแรงดันไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์จำนวนอนุภาค แสดงในรูปที่ 5.25 กราฟผลต่างของแรงดันกับเวลา ของตัวตรวจรู้ที่ 1 กับตัวตรวจรู้ที่ 2 นำกราฟที่ได้ไปทำการกรองสัญญาณที่ความถี่เหมือนกรณีที่ 1 ได้ดังรูปที่ 5.26



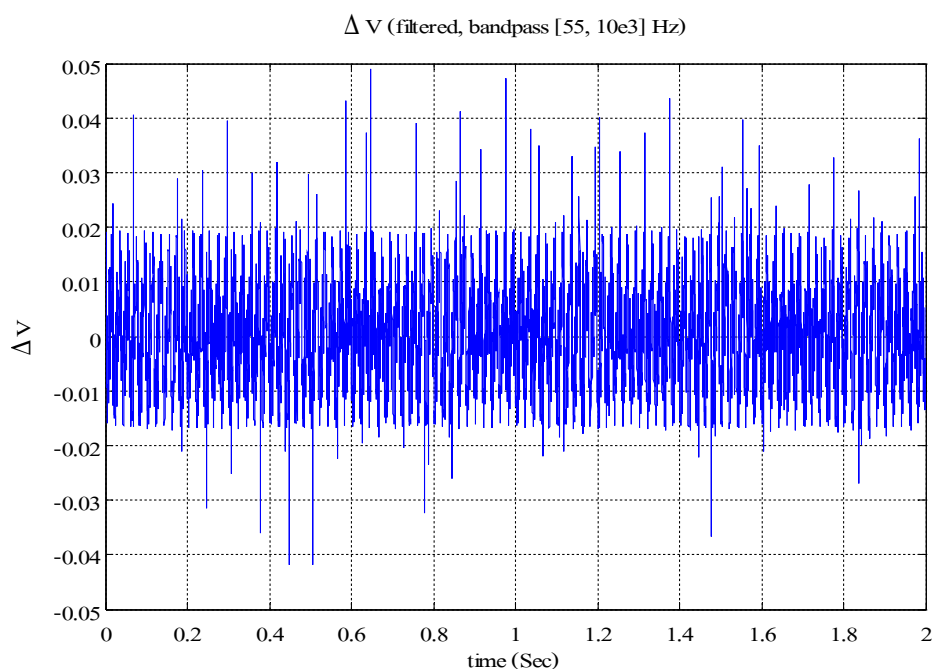
รูปที่ 5.23 กราฟผลตอบแทนของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0–2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 1



รูปที่ 5.24 กราฟผลตอบสนองของชุดน้บอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา
พิจารณาในช่วง 0–2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 2

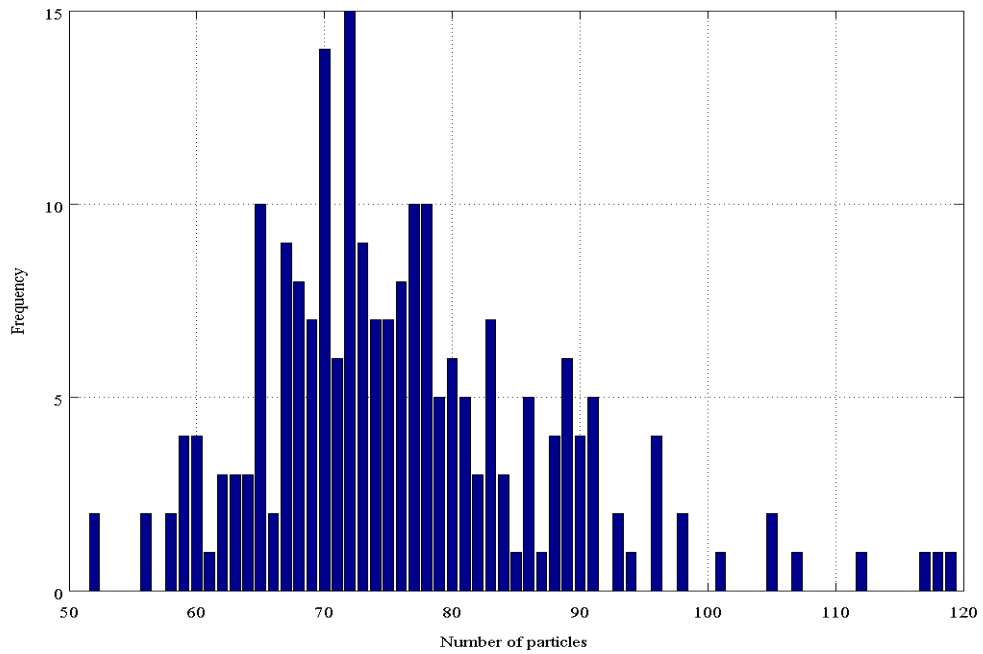


รูปที่ 5.25 กราฟผลต่างของแรงดันกับเวลาของตัวตรวจรู้ที่ 1 กับตัวตรวจรู้ที่ 2

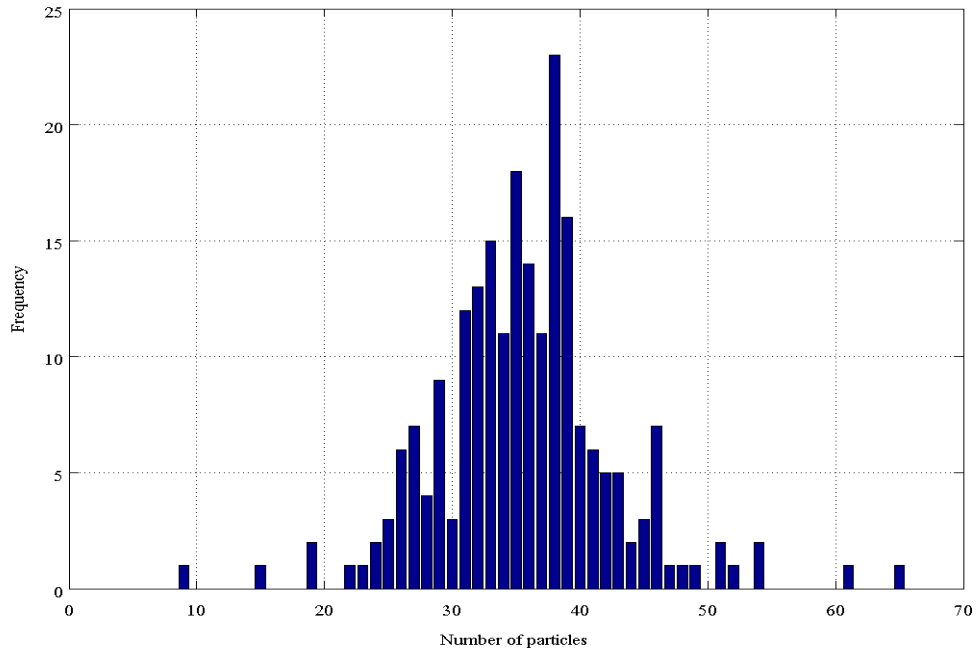


รูปที่ 5.26 กราฟผลต่างของแรงดันเมื่อผ่านการกรองสัญญาณในช่วงความถี่ 55 Hz-10 kHz ผ่าน

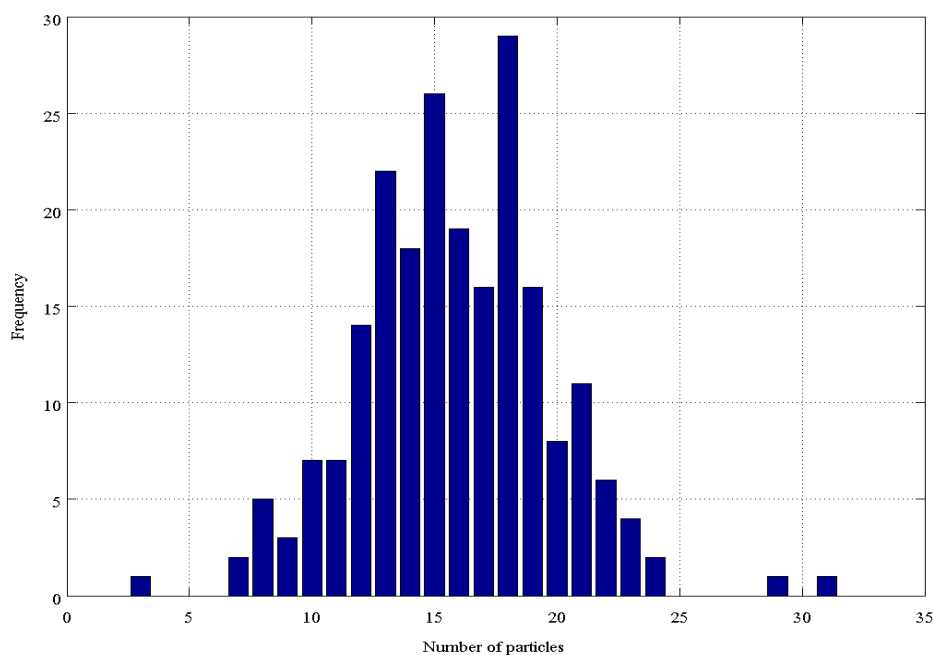
จากนั้นทำการนับจำนวนอนุภาค โดยทำการทดลองนับจำนวนอนุภาคที่ระดับแรงดันต่าง ๆ เพื่อดูว่าระดับแรงดันใดเป็นค่าที่ควรใช้เป็นแรงดันอ้างอิง ในการนับจำนวนอนุภาค โดยทำการทดลองนับจำนวนอนุภาคที่ระดับแรงดันอ้างอิงตั้งแต่ค่า ± 0.020 โวลต์ ถึง ± 0.036 โวลต์ โดยเพิ่มขึ้นทีละ ± 0.002 โวลต์ ได้ผลการนับอนุภาคที่ระดับอ้างอิงต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.3 และสามารถเขียนกราฟที่ระดับแรงดันอ้างอิง ± 0.026 โวลต์ ได้ดังรูปที่ 5.27 ที่ระดับแรงดันอ้างอิง ± 0.030 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 5.28 และที่ระดับแรงดันอ้างอิง ± 0.036 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 5.29 จากตารางค่าระดับแรงดันอ้างอิงที่เหมาะสมคือ ± 0.030 โวลต์ เมื่อนับจำนวนอนุภาคนับได้เฉลี่ยที่ 38 อนุภาค/ $1.8 \mu\text{l}$ ดังรูปที่ 5.30 จากผลการนับตลอด 218 ช่วงเวลา ซึ่งที่ระดับอ้างอิงดังกล่าวนับอนุภาคได้ค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ในการทดลองนับอนุภาคแต่ละครั้ง จากผลการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ภายใต้งื่อนไขเดียวกัน ยังไม่เพียงพอที่จะสามารถยืนยันได้ว่าชุดนับอนุภาคของตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นถูกต้อง จึงทำการทดสอบนับจำนวนอนุภาค โดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของอนุภาคดังที่จะกล่าวต่อไปในผลการนับจำนวนอนุภาค กรณีที่ 4



รูปที่ 5.27 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.026 โวลต์



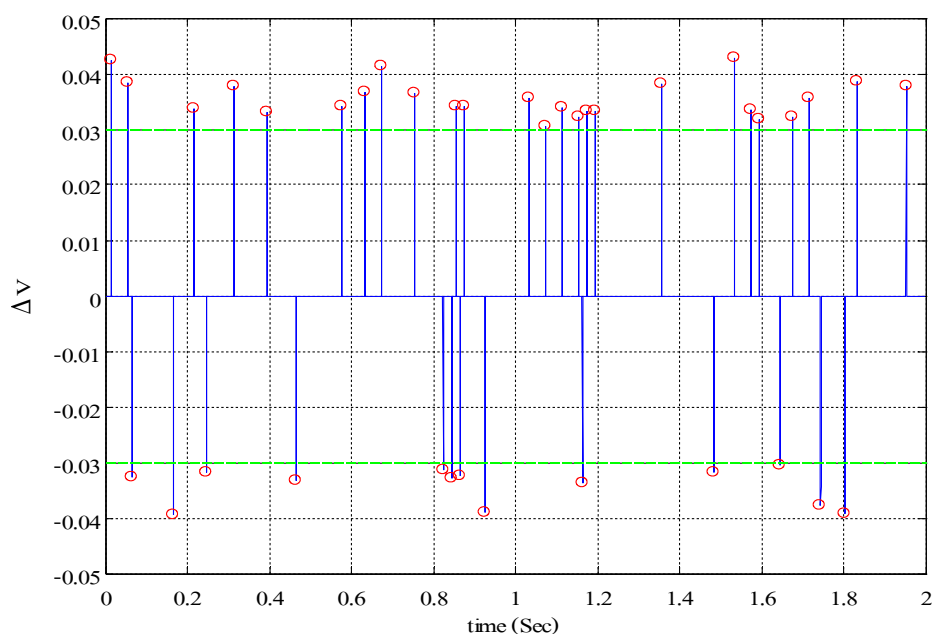
รูปที่ 5.28 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.030 โวลต์



รูปที่ 5.29 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.036 โวลต์

ตารางที่ 5.3 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 44 อนุภาค/1.8 μ l

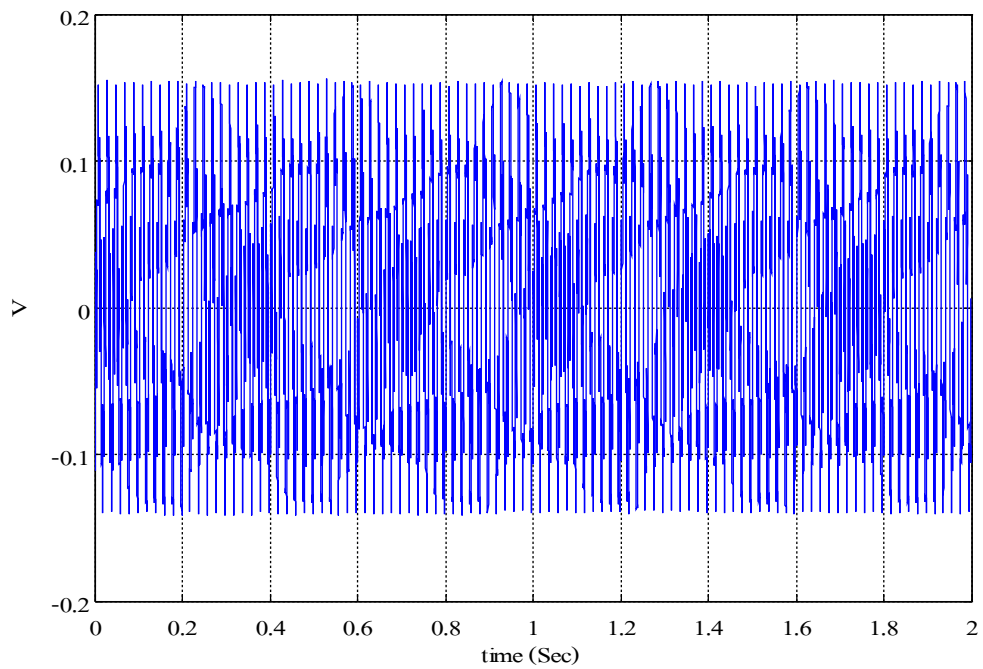
ระดับแรงดัน อ้างอิง (โวลต์)	จำนวนอนุภาค จากการคำนวณ ในเวลา 2 วินาที	จำนวนอนุภาค เฉลี่ยในเวลา 2 วินาที	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	จำนวนอนุภาค ทั้งหมดที่นับได้
± 0.020	44	87	39.65	18,966
± 0.022	44	84	34.27	18,312
± 0.024	44	81	29.88	17,658
± 0.026	44	76	21.56	16,568
± 0.028	44	55	18.32	11,990
± 0.030	44	38	8.13	8,284
± 0.032	44	30	5.19	6,540
± 0.034	44	22	4.87	4,796
± 0.036	44	18	4.13	3,924



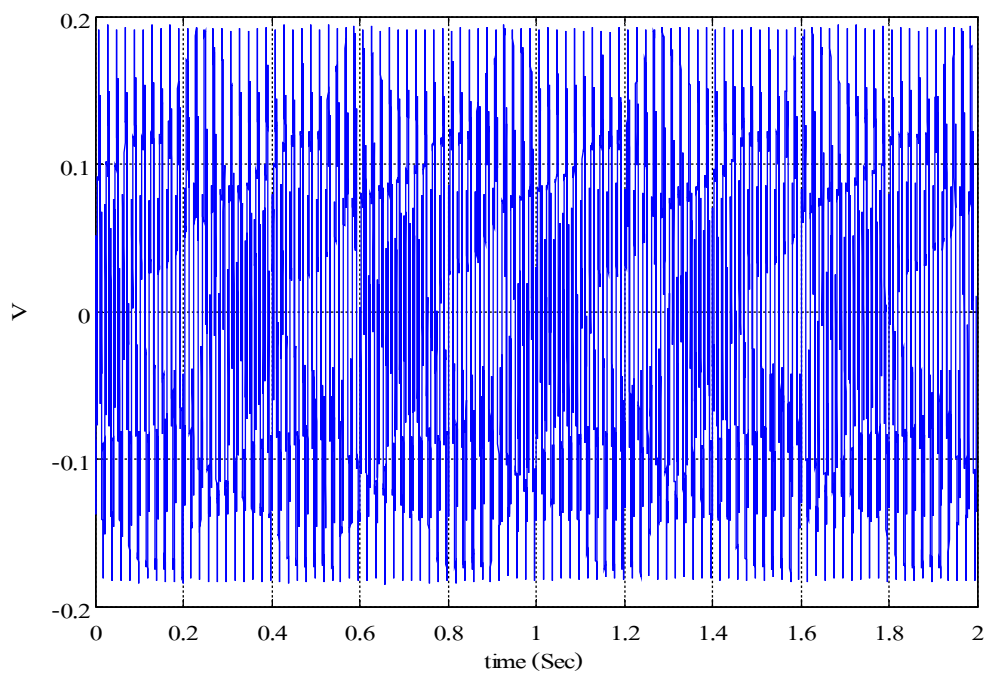
รูปที่ 5.30 ผลการนับอนุภาคได้ 38 อนุภาค/1.8 μ l

5.2.4 ผลการนับจำนวนอนุภาค กรณีที่ 4

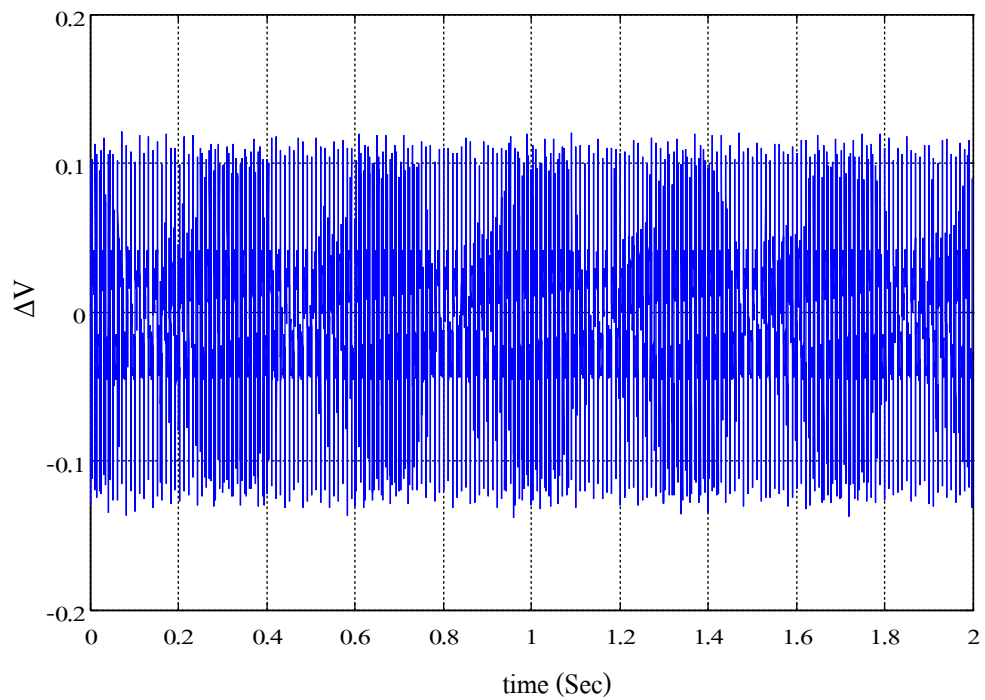
ทำการทดลองเหมือนการนับจำนวนอนุภาค กรณีที่ 3 ค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่ 1 ได้ผลดังรูปที่ 5.31 กราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0–2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 1 ค่าแรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่ 2 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.32 กราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา พิจารณาในช่วง 0–2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 2 จากนั้นนำไปหาผลต่างของแรงดันไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์จำนวนอนุภาค แสดงดังรูปที่ 5.33 กราฟผลต่างของแรงดันกับเวลาของตัวตรวจรู้ที่ 1 กับตัวตรวจรู้ที่ 2 นำกราฟที่ได้ไปทำการกรองสัญญาณที่ความถี่เหมือนกรณีที่ 1 ได้ดังรูปที่ 5.34 จากนั้นทำการนับจำนวนอนุภาค โดยทำการทดลองนับจำนวนอนุภาคที่ระดับแรงดันต่าง ๆ เพื่อดูว่าระดับแรงดันใดเป็นค่าที่ควรใช้เป็นแรงดันอ้างอิง ในการนับจำนวนอนุภาค โดยทำการทดลองนับจำนวนอนุภาคที่ระดับแรงดันอ้างอิงตั้งแต่ค่า ± 0.020 โวลต์ ถึง ± 0.036 โวลต์ โดยเพิ่มขึ้นทีละ ± 0.002 โวลต์ ได้ผลการนับอนุภาคที่ระดับอ้างอิงต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.3 และสามารถเขียนกราฟที่ระดับแรงดันอ้างอิง ± 0.026 โวลต์ ได้ดังรูปที่ 5.35



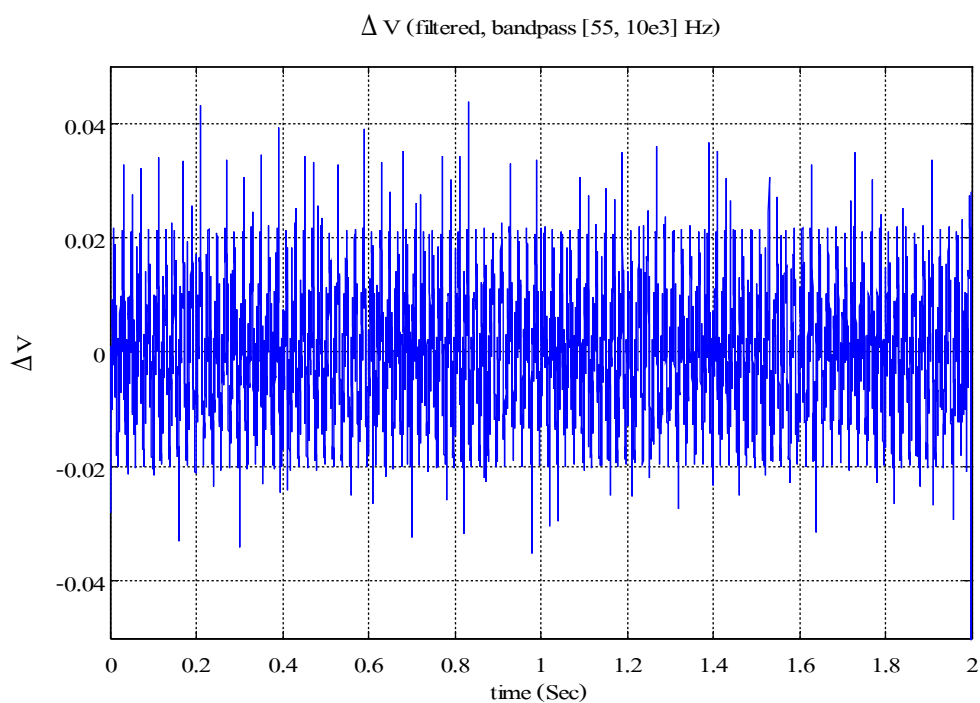
รูปที่ 5.31 กราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา
พิจารณาในช่วง 0-2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 1



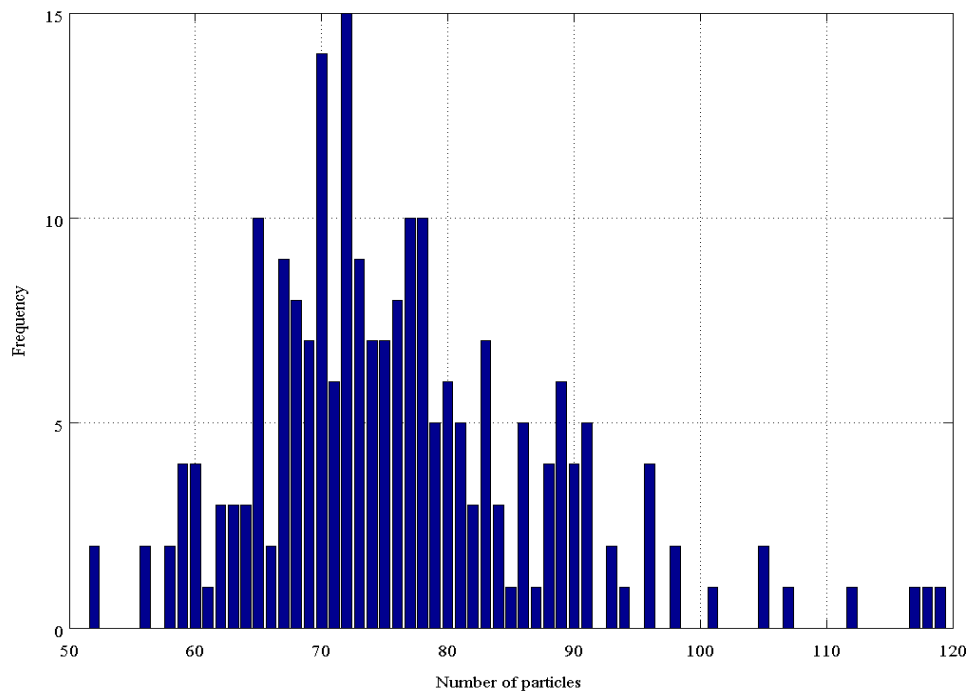
รูปที่ 5.32 กราฟผลตอบสนองของชุดนับอนุภาคแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันกับเวลา
พิจารณาในช่วง 0-2 วินาที ของตัวตรวจรู้ที่ 2



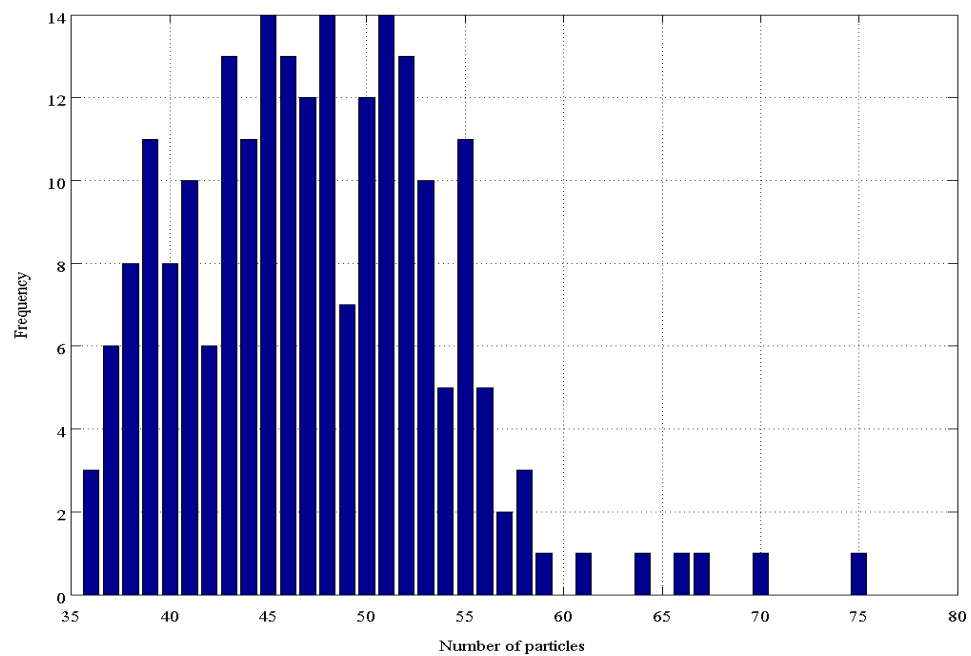
รูปที่ 5.33 กราฟผลต่างของแรงดันกับเวลาของตัวตรวจรู้ที่ 1 กับตัวตรวจรู้ที่ 2



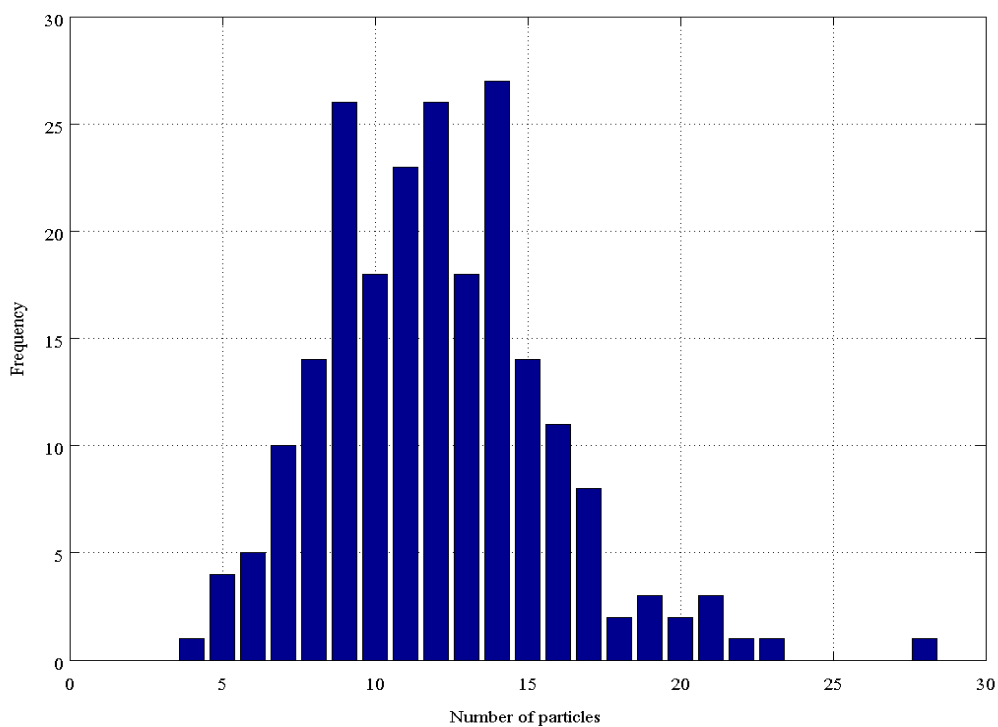
รูปที่ 5.34 กราฟผลต่างของแรงดันเมื่อผ่านการกรองสัญญาณในช่วงความถี่ 55 Hz-10 kHz ผ่าน



รูปที่ 5.35 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ +/-0.026 โวลต์



รูปที่ 5.36 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ +/-0.030 โวลต์

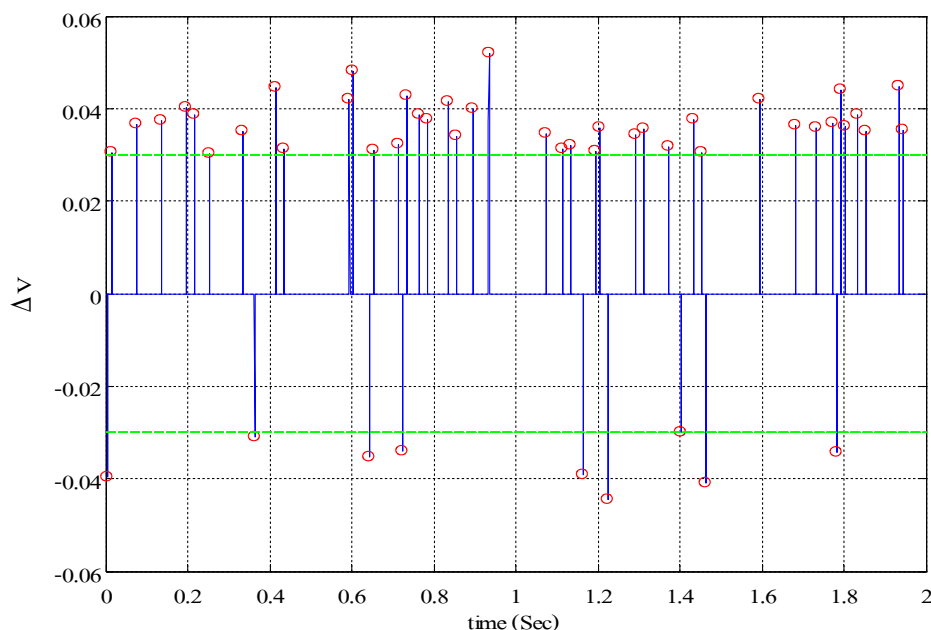


รูปที่ 5.37 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงเท่ากับ ± 0.036 โวลต์

ตารางที่ 5.4 ผลการนับจำนวนอนุภาคที่ระดับอ้างอิงต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 66 อนุภาค/1.8 μl

ระดับแรงดัน อ้างอิง (โวลต์)	จำนวนอนุภาค จากการคำนวณ ในเวลา 2 วินาที	จำนวนอนุภาค เฉลี่ยในเวลา 2 วินาที	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	จำนวนอนุภาค ทั้งหมดที่นับได้
± 0.020	66	90	40.72	19,620
± 0.022	66	84	31.05	18,312
± 0.024	66	78	27.49	17,004
± 0.026	66	75	23.81	16,350
± 0.028	66	64	19.77	11,336
± 0.030	66	52	10.07	9,810
± 0.032	66	37	7.94	8,066
± 0.034	66	28	6.13	6104
± 0.036	66	12	5.54	2,616

จากตารางที่ 5.4 ค่าระดับแรงดันอ้างอิงที่ทำการนับจำนวนอนุภาค ได้ใกล้เคียงกับที่คำนวณได้ คือ ± 0.030 โวลต์ เมื่อทำการนับจำนวนอนุภาคนับได้เฉลี่ยที่ 52 อนุภาค/ $1.8 \mu\text{l}$ ซึ่งจากผลการนับตลอด 218 ช่วงเวลา ดังแสดงในรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.38 ผลการนับอนุภาคได้ 52 อนุภาค/ $1.8 \mu\text{l}$

5.2.5 สรุป

ผลการนับจำนวนอนุภาคกรณีที่ 2 ซึ่งคำนวณความเข้มข้นอนุภาคได้ 22 อนุภาค/ $1.8 \mu\text{l}$ จากผลการทดลองวัดจำนวนอนุภาคโดยใช้ระดับอ้างอิงเป็นเกณฑ์พบว่าที่ระดับอ้างอิง ± 0.030 โวลต์ สามารถนับจำนวนอนุภาค โดยเฉลี่ยได้ 18 อนุภาค/ $1.8 \mu\text{l}$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวณ ส่วนของกรณีที่ 3 คำนวณความเข้มข้นได้ 44 อนุภาค/ $1.8 \mu\text{l}$ จากการทดลองนับจำนวนอนุภาคโดยเฉลี่ยได้ 38 อนุภาค/ $1.8 \mu\text{l}$ และกรณีที่ 4 ใช้ค่าระดับอ้างอิงเดียวกัน คำนวณความเข้มข้นได้ 66 อนุภาค/ $1.8 \mu\text{l}$ จากการทดลองสามารถนับจำนวนอนุภาคโดยเฉลี่ยได้ 52 อนุภาค/ $1.8 \mu\text{l}$ ผลจากการทดลองทั้ง 3 กรณี สามารถใช้ค่าระดับอ้างอิงค่าเดียวกัน ได้จำนวนอนุภาคที่น้อยกว่าความเป็นจริง แต่ถือว่าเป็นช่วงที่ยอมรับได้ ถ้าใช้ค่าอ้างอิงที่น้อยกว่า ± 0.030 โวลต์ จะทำให้ผลการนับจำนวนอนุภาคมากกว่าความเป็นจริง และถ้าใช้ค่าอ้างอิงมากกว่า ± 0.030 โวลต์ จะทำให้ผลการนับจำนวนอนุภาคน้อยกว่าความเป็นจริง ดังแสดงในตารางที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 ซึ่งผลที่ได้เกิดจากการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการ ออกแบบและ สร้างตัวตรวจรู้เพื่อทำการนับจำนวนอนุภาคซึ่ง แขนงลอยใน สาร ละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยเริ่ม การ ออกแบบ และ สร้าง ตัวตรวจรู้ ด้วยเทคโนโลยี แผ่นวงจรพิมพ์ ได้ทำการออกแบบและส่งไปสร้างที่บริษัทผลิตวงจรรวมเชิงพาณิชย์ เพื่อลดขั้นตอน ในการทำงาน รวมทั้งการออกแบบและสร้างด้วยฟิล์มแข็ง ช่องทางเดินจุลภาคที่ได้มีขนาดใหญ่กว่า ขนาดของอนุภาค จึงได้นำเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคมาใช้ในการออกแบบและสร้างช่องทางเดินจุลภาคของตัวตรวจรู้ ซึ่งใช้ในการนับจำนวนอนุภาคในงานวิจัยนี้ ตัวตรวจรู้สร้างขึ้นจากแม่พิมพ์ นิกเกิลบนกราฟไฟต์และบนกระจก ซึ่งแม่พิมพ์นิกเกิลบนกระจกดีกว่าบนกราฟไฟต์ เนื่องจากไม่มีปัญหา เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นช่องทางเข้า-ออกของของเหลวที่มีขั้วอิเล็กโทรด กับช่องทางเดินจุลภาค ที่ทำด้วยซิลิโคน PDMS ซึ่งทำการเชื่อมด้วยการทำพลาสมาของออกซิเจน ที่ความดัน 0.26 mbar กำลัง RF 100 W เป็นเวลา 1 นาที และใช้น้ำบริสุทธิ์ เป็นตัวเชื่อมเพื่อให้ชิ้นงานวางตรง ตำแหน่งที่ต้องการได้ ตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นมีช่องทางเดินจุลภาค ขนาดกว้าง 50 μm ยาว 140 μm และ สูง 70 μm ซึ่งเป็นบริเวณที่ขั้วอิเล็กโทรดบรรจุอยู่ จากนั้นทำการคำนวณค่าความต้านทานของช่องทางเดินจุลภาค โดยช่องทางเดินจุลภาคที่มีสารละลายบรรจุอยู่เพียงอย่างเดียวจะมีค่าความต้านทาน ค่าหนึ่ง เมื่อมีอนุภาคซึ่งแขนงลอยในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่เข้าไปในช่องทางเดินจุลภาค ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้น เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้น ได้ทำการประมาณ ค่าความต้านทานช่องทางเดินจุลภาค 2 วิธี ได้แก่ การประมาณค่าความต้านทานช่องทางเดินจุลภาค ด้วยสภาพต้านทานไฟฟ้ายังผลของแมกซ์เวลล์ และวิธีการ ประมาณค่าความต้านทานช่องทางเดิน จุลภาคด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้า ที่พัฒนาขึ้นใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ โดยวิธีของแมกซ์เวลล์ สมมุติให้ อนุภาคภายในช่องทางเดินจุลภาคมีขนาดเล็กกว่าช่องทางเดินมาก ๆ เมื่อจากการวัดค่าความต้านทาน ทางไฟฟ้าพบว่า ช่องทางเดินจุลภาคซึ่งภายในบรรจุ 1 อนุภาคมีค่าความต้านทาน 275.65 $\text{k}\Omega$ 2 อนุภาค มีค่าความต้านทาน 301.29 $\text{k}\Omega$ และ 3 อนุภาคมีค่าความต้านทาน 326.94 $\text{k}\Omega$ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานที่คำนวณได้จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้า พบว่า ความต้านทานจากการคำนวณด้วย วงจรสมมูลทางไฟฟ้า มีค่าความผิดพลาดน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีของแมกซ์เวลล์ ทั้งนี้เนื่อง จากอนุภาคที่ใช้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของช่องทางเดินจุลภาค เมื่อทำการทดสอบตัวตรวจรู้โดย

ให้นับจำนวนอนุภาคที่แขวนลอยในสารละลาย จากการทดลองพบว่า การใช้ตัวตรวจรู้เพียงหนึ่งตัวไม่สามารถนับจำนวนอนุภาคได้ เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนมากจึงใช้ตัวตรวจรู้ 2 ตัว โดยตัวตรวจรู้ที่สองบรรจุสารละลายที่ไม่มีอนุภาค ผลจากการ วัดความต้านทานของตัวตรวจรู้ทั้งสองตัวพบว่า เมื่อนำสัญญาณที่วัดได้จากตัวตรวจรู้ทั้งสองตัวมาหักลบกัน พบว่าสามารถลดสัญญาณรบกวนลงได้ เมื่อนำสัญญาณสุทธิมำจัดสัญญาณรบกวนเพิ่มเติม โดยใช้การกรองสัญญาณแบบแบนพาสฟิวเตอร์ ในช่วงความถี่ 55 Hz–10 kHz และกำหนดระดับสัญญาณขั้นต่ำที่จะทำการนับ จากการนับอนุภาคในกรอบระยะเวลา 2 วินาที ในกรอบ 218 ช่วง และใช้ระดับแรงดันขั้นต่ำ พบว่าเมื่อใช้สารละลายอ้างอิงที่มีจำนวนอนุภาคแขวนลอยอยู่ 22 อนุภาค/1.8 μl จะได้ค่าจากการทดลองเท่ากับ 18 อนุภาค/1.8 μl เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคในสารละลายอ้างอิงขึ้นเป็น 44 อนุภาค/1.8 μl จะได้ค่าจากการทดลอง 38 อนุภาค/1.8 μl และเพิ่มขึ้นจนถึงค่า 66 อนุภาค/1.8 μl จะได้ค่าจากการทดลอง 52 อนุภาค/1.8 μl เพื่อยืนยันผลการทดลองอีกครั้งหนึ่ง สารละลายที่ไม่มีอนุภาคได้ถูกป้อนเข้าไปตัวตรวจรู้ทั้งสองตัวแล้วทำการนับ ซึ่งพบว่านับได้จำนวนศูนย์อนุภาค ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การนับจำนวนอนุภาคที่แขวนลอยในสารละลายด้วยตัวตรวจรู้ และวิธีการวัดที่พัฒนาขึ้น สามารถทำการนับจำนวนอนุภาคได้จริง และมีแนวโน้มที่จะสามารถพัฒนาให้เป็นอุปกรณ์นับจำนวนอนุภาคที่ใช้ประโยชน์ได้ เช่น เม็ดเลือดและเกล็ดเลือดต่อไปในอนาคต

6.2 ข้อเสนอแนะ

ตัวออกแบบที่สร้างขึ้นเป็นแบบช่องทางเดินจุลภาคเดียว ทำให้มีปัญหาขณะทำการวัดผล เนื่องจากใช้เวลาในการวัดผลนาน จึงควรออกแบบช่องทางเดินจุลภาคแบบหลายช่องทางเดินเพื่อประหยัดเวลาในการวัดผล และสามารถวิเคราะห์ผลที่มีปริมาณมาก ๆ ได้อย่างรวดเร็ว

รายการอ้างอิง

- Allen, T. (1981). **Particle Size Measurement (3rd ed.)**. Chapman and Hall, New York.
- Agency for Healthcare Research and Quality (AHRQ). (2005). **Management of allergic rhinitis in the working-age population, Evidence Report/ Technology Assessment 67**.
- Accolm, I.J. (1994). **Dictionary of Ceramic Science and Engineering (2nd ed.)**. Plenum Press, New York.
- Altendorf, E., Zebert, D., Holl, M. and Yager, P. (1997). Differential Blood cell Counts Obtained Using a Microchannel Based Flow Cytometry. **Transducers**. 97 : 531 - 534.
- Bumiller, M., and Oja, T. (1997). **Measuring Particle Size at High Concentration. Ceramic Industry**.
- Cram, S., et al. (1992). New Flow Cytometric Capabilities at the National Flow Cytometry Resource. **Proceeding of the IEEE**, vol 80. 912 - 917.
- Coulter, W.H. (1956). High speed automatic blood cell counter and cell size analyzer, **Proceedings of the National Electronics Conference**. 12 : 1034 - 1040.
- De Luca, S.J., Voorhees, K.J. and Sarver, E.W. (1986). Pyrolysis mass spectrometry methodology applied to southeast Asian environmental samples for differentiating digested and undigested pollens. **Analytical Chemistry**. 58 : 2439 - 2442.
- DeBlois, R.W. and Bean, C.P. (1970). Counting and Sizing of Submicron Particles by the Resistive pulse Technique. **Review Science Instrument**. 41 : 909 - 916.
- Koch, M., Evans, A.G.R. and Brunnschweiler, A. (1999). Design and Fabrication of a Micromachined Coulter Counter, **Journal of Micromechanics and Microengineering**. 9 : 159 - 161.
- Larsen, U.D., Blankenstein, G. and Branebjerg, J. (1997). Microchip coulter Particle counter, Proceeding of the International Conference on Solid-State. **Sensors and Actuators**. 1319 - 1322.

- Lee, D.W., Yi, S. and Cho, Y.- H. (2005) Particle concentration sensor using control volume between double electrical sensing zones. **Sensors and Actuators**. vol. 77, issue 2 : 157 - 166.
- Maxwell, J.C. (1904). **A treatise on Electricity and Magnetism**. Clarendon, Oxford, vol 1,440.
- Nieuwenhuis, J.H., Kohl, F., Bastemeijer, J. and Vellekoop, M.J. (2003). First Particle Measurement with An Integrated Coulter Counter based on 2 - Dimensional Aperture Control. **Transducer**. 03 : 296 - 299.
- Papa, G., Caraamiello, R. and Balbi, P. (1988). Preliminary Results for Pollen characterization of *Corylus* species and their interspecific hybrids by pyrolysis method, **Allionia/bolletino dell Istituto ed botanico dell Universita Torino**. 28 : 85 - 92.
- Prescott, L.M., Harley, J.P. and Klein, D.A. (2002). **Microbiology**. McGraw-Hill, New York.
- Reed, J.S. (1988). **Introduction to the Principles of Ceramic Processing**. John Wiley & Sons, New York.
- Reidiker, M., Koller, T. and Monn, C. (2000). Differences in size selective aerosol sampling for pollen allergen detection using high volume cascade impactors. **Clinical and Experimental Allergy**. 30 : 867 - 873.
- Robert, K., Parameswaran, M., Moor, M. and Muller, R.S. (1999). A Silicon Microfabricated Aperture for Counting Cells using The Aperture Impedance Technique. **Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and /computer Engineering**. 1668 - 1873.
- Saleh, O.A. (2003). **A Novel Resistive Pulse Sensor For Biological Measurement**. Doctoral thesis, 8 - 14.
- Saleh, O.A. And Sohn, L.L. (2001). Quantitative Sensing of nanoscale colloids using a microchip coulter counter. **Review of Scientific Instruments**. vol.72, no. 12, pp. 4449 - 4451.
- Satake, D., et al. (2002). A sensor for blood cell counter using MEMS technology. **Sensors and Actuators B**. 83: pp. 77 - 81.
- Schenk, P.A., Deleeuw, J.W., Van, G.G., Haverkamp, J. and Bouman, M. (1981). Analysis of recent spores and pollen and of thermally altered sporopollenin by flash pyrolysis-mash spectrometry and flash pyrolysis-gas Chromatography- mass spectrometry. **Proceedings of the Symposium on International Palynology Conference London**. vol. 5, 225 - 237.

- Shinichi, U. (2001). WP402G Water Particle Counter. **Yokogawa Technical Report English Edition**. no. 31, 11-15.
- Son, S., Choi, Y.H. and Lee, S.S.(2003). Fabrication of Micro Cell Counter with Boron Diffused Resistor. **Proceeding of the IEEE**. 311-314.
- Symthe, W.R. (1972). **Review of Scientific Instruments**. 45. 817.
- Walters, N.J., Estridge, B.H. And Reynolds, A.P. (1996). **Basic Medical Laboratory techniques (3rd ed.)**. Delmar Publishers Inc. New York.
- Ward-Smith, S. (2000). **The Importance of Particle Sizing in the Ceramic Industry**, Documentary Meeting for Ceramic Suppliers Meet Ceramic Manufacturers.
- Xie, Y., Hopke, P.K. and Wienke, D. (1994). Airborne particle classification with a combination of chemical composition and shape index utilizing an adaptive resonance artificial neural network. **Environmental Science and Technology**. 28 : 1921-1928.
- Yang, Y., Zange, Z-X., Yang, X-H. and Jiang, D-Z. (1998). The Blood Cell Counting and Classification from Stationary Suspensions by Laser Light Scattering Method, **Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering In Medicine and Biology Society**. vol 20. 1885-1888.
- Zhang, Z., Zhe, J., Chandra, S. and Hu, J. (2005). An electronic pollen detection method using Coulter counting principle, **Atmospheric Environment**.

ภาคผนวก ก

กระบวนการเจาะรูกระจก

กระบวนการเจาะรูกระจก

แสดงรายละเอียดขั้นตอนและลำดับกระบวนการเจาะรูกระจกด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก ที่มี ความเข้มข้น 48% (HF) ในบทที่ 4

(ก) เตรียมแผ่นกระจกขนาด 1 นิ้ว × 3 นิ้ว ทำความสะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ตามด้วยอะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ ตามด้วยคลื่นความถี่สูง เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้น ทำการเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และกำจัดความชื้นบนผิวกระจก ที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 30 นาที บนแผ่นความร้อน (hot plate) และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(ข) เคลือบด้วยสติ๊กเกอร์บนแผ่นกระจกทั้งสองด้าน

(ค) เคลือบด้วยสารไวแสงโฟโตริซิชันฟิล์ม (Dry film) ที่อุณหภูมิ 90°C เพียงด้านเดียว

(ง) นำชิ้นงานไปถ่ายแบบลวดลายโครงสร้างด้วยแสง UV ผ่านโฟโตมาสก์ (photo mask) ลงบนสารไวแสงเป็นเวลา 1 นาที แล้วใช้คัตเตอร์ตัดสารไวแสงและสติ๊กเกอร์ตรงบริเวณที่ต้องการ เจาะรูกระจกออกพร้อมทั้งตัดสติ๊กเกอร์อีกด้านออกด้วย

(จ) ลอกสารไวแสงออกทั้งหมด จากนั้นนำไปทำการเจาะรูโดยการต่อท่อพลาสติก ที่มีเส้น ผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร สูง 3 นิ้ว ตรงบริเวณรูที่ต้องการเจาะและยึดท่อโดยใช้ดินน้ำมันล้อมรอบ เติมกรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น 48% ลงไปจนเต็มท่อแล้วปล่อยให้ทำงานกระทั่งกระจกทะลุใช้เวลา ประมาณ 1 วัน

(ฉ) เมื่อกระจกทะลุให้แกะท่อพลาสติกและดินน้ำมันออก แล้วลอกสติ๊กเกอร์ทั้งสองด้าน ของแผ่นกระจกที่เจาะรูออก นำไปทำความสะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ตามด้วย อะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ ตามด้วยคลื่นความถี่สูง เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นจึงเป่าให้แห้งด้วย แก๊สไนโตรเจน และนำไปกำจัดความชื้นบนผิวกระจกที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 30 นาที บนแผ่น ความร้อน (hot plate) และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แต่กระบวนการเจาะรูกระจกด้วยวิธีนี้ ใช้เวลานานมากและได้ขนาดของรูไม่คงที่

รายละเอียดขั้นตอนและลำดับกระบวนการเจาะรูกระจกด้วยการยิงทราย

(ก) นำแผ่นสแตนเลสมาเจาะรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ห่างกัน 1 เซนติเมตร จำนวน 2 รู ตามที่ออกแบบไว้ เพื่อทำเป็นแบบในการกั้นตรงส่วนที่ไม่ต้องการเจาะรู จากนั้นนำแผ่นกระจกขนาด 1 นิ้ว \times 1.5 นิ้ว ที่ต้องการเจาะรูนั้นประกบกับแผ่นสแตนเลสที่เตรียมไว้

(ข) ทำการยิงทรายไปยังแผ่นสแตนเลสเพื่อทำการเจาะรูกระจก โดยทรายที่ฟ่นไปกระทบส่วนที่เป็นแผ่นสแตนเลสก็จะสะท้อนกลับ ส่วนที่ฟ่นไปถูกแผ่นกระจกก็จะเกิดรูขึ้น ซึ่งแต่ละแผ่นใช้เวลาในการเจาะรูกระจกประมาณ 5 นาที วิธีการเจาะรูกระจกด้วยการยิงทราย ใช้เวลาในการเจาะสั้นกว่า และได้ขนาดของรูตามที่ต้องการ

(ค) เมื่อได้กระจกที่เจาะรูเรียบร้อยแล้วนำไปทำความสะอาด ด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ตามด้วยอะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ ตามด้วยคลื่นความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และกำจัดความชื้นบนผิวกระจกที่อุณหภูมิ 200°C นาน 30 นาที บนแผ่นความร้อน (hot plate) และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

ภาคผนวก ข

กระบวนการสร้างแม่พิมพ์นิกเกิลของช่องทางเดินจุลภาค

กระบวนการสร้างแม่พิมพ์นิกเกิลของช่องทางเดินจุลภาค

รายละเอียดขั้นตอนและลำดับกระบวนการสร้างแม่พิมพ์นิกเกิลของช่องทางเดินจุลภาคด้วยนิกเกิลบนแผ่นกราฟไฟต์

(ก) แผ่นกราฟไฟต์ขนาด 1 นิ้ว x 1.25 นิ้ว ทำความสะอาดโดยใช้ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ล้างทั้งแผ่น ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ และทำความสะอาดด้วยคลื่นความถี่สูง 5 นาที ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์อีกครั้ง เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนและนำไปอบกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 95°C นาน 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(ข) เคลือบสารไวแสงโฟโตริซิชชนิดลบ SU-8 100 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาที ตามด้วยความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที นำไปอบในเตาอบ (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวทำละลาย (solvent) ในสารไวแสงโฟโตริซิสระเหยออก ชั้นฟิล์มจะแห้งและปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(ค) ถ่ายแบบลวดลายโครงสร้างด้วยแสง UV ผ่านโฟโตมาสก์ลงบนสารไวแสงโฟโตริซิสเป็นเวลา 1 นาที และนำไปอบในเตาอบ (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95°C นาน 2 ชั่วโมง เพื่อก่อให้เกิดการเปลี่ยนสารประกอบโดยวิธีต่อเชื่อมของไอออนบวก (cross-linking) ของสารไวแสงโฟโตริซิส ส่วนที่ถูกแสงฉาย และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(ง) นำไปลอกสารไวแสงโฟโตริซิส ส่วนที่ไม่โดนฉายแสง ล้างด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ แล้วอบบนแผ่นความร้อน (hard bake) ที่อุณหภูมิ 95°C นาน 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเตรียมชิ้นงานไปชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้า โดยการต่อสายไฟและปิดเทปกาวยึดที่ด้านล่างของฐานกราฟไฟต์เพื่อป้องกันนิกเกิลถูกชุบด้วยไฟฟ้าที่ด้านล่าง

(จ) ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยวิธีพลาสมาของออกซิเจน ที่ความดัน 0.3 mbar กำลัง RF 100 W เป็นเวลา 2 นาที

(ฉ) นำชิ้นงานไปชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ด้วยความหนาแน่นกระแส 5 mA/cm² โดยให้แผ่นโลหะนิกเกิลเป็นขั้วแอโนด และแผ่นชิ้นงานเป็นขั้วแคโทด เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง หรือจนกว่ามวลนิกเกิลจะสูงเกินกว่าผิว SU-8

(ช) จากนั้นขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายซิลิกอนคาร์ไบด์เบอร์ 500 จนกระทั่งผิวของนิกเกิลและ SU-8 เรียบเสมอกัน เครื่องขัดจะกำหนดความเร็วงานขัดอยู่ที่ 70 รอบต่อนาที โดยใช้มือจับชิ้นงานและใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นระหว่างการขัดผิวชิ้นงาน แล้วจึงขัดด้วยกระดาษทราย

ซิลิโคนคาร์ไบด์เบอร์ 1,200 ตามเงื่อนไขเดียวกัน หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการขัดมัน โดยจะขัดด้วยผ้าขัดชนิด DP Nap ด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 1 μm และ 0.3 μm ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 2 ขั้นตอนต้องมีเงื่อนไขการขัดเดียวกัน คือ ใช้ความเร็วงานหมุนที่ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้มือจับชิ้นงาน

(ข) สกัดชั้น SU-8 100 ออกโดยการต้มในน้ำยา remover PG จากนั้นทำความสะอาดชิ้นงานด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ตามด้วยอะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ จากนั้นตามด้วยคลื่นความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาที เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 95°C นาน 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป

รายละเอียดขั้นตอนและลำดับกระบวนการสร้างแม่พิมพ์นิกเกิลของช่องทางเดินจุลภาค ด้วยนิกเกิลบนแผ่นกระจก

(ก) นำแผ่นกระจกขนาด 1 นิ้ว x 1.25 นิ้ว ทำความสะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ให้ทั่วทั้งแผ่น ตามด้วยน้ำบริสุทธิ์ และทำความสะอาดด้วยคลื่นความถี่สูง 5 นาที ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนและนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 95°C นาน 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(ข) เคลือบฟิล์มโลหะ 3 ชั้น ด้วยไทเทเนียมหนาประมาณ 500 อังสตรอม ชั้นทองแดงหนาประมาณ 1,500 อังสตรอม และชั้นไทเทเนียมหนาประมาณ 500 อังสตรอม ตามลำดับด้วยกระบวนการระเหยไอในสุญญากาศ จากนั้นทำความสะอาดด้วยอะซิโตน ตามด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนและนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 95°C นาน 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(ค) เคลือบสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดลบ SU-8 100 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาที ตามด้วยความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที นำไปอบในเตาอบ (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95°C นาน 6 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวทำละลาย (solvent) ในสารไวแสงโฟโตริซิสระเหยออก ชั้นฟิล์มจะแห้งและปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(ง) ถ่ายแบบลวดลายโครงสร้างด้วยแสง UV ผ่านโฟโตมาสก์ลงบนสารไวแสงโฟโตริซิสเป็นเวลา 1 นาที และนำไปอบในเตาอบ (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95°C นาน 2 ชั่วโมง เพื่อก่อให้เกิดการเปลี่ยนสารประกอบโดยวิธีต่ออนุของไอออนบวก (cross-linking) ของสารไวแสงโฟโตริซิส ส่วนที่ถูกละลาย และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(จ) ลอกสารไวแสงโฟโตริซิส ส่วนที่ไม่โดนฉายแสง ล้างด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ และน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน กำจัดความชื้นและเพิ่มความแข็งแรงให้ชั้นฟิล์ม โดยนำไปอบบนแผ่นความร้อน (hard bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง นำชิ้นงานไปชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้า โดยทำการต่อสายไฟเข้าที่ชิ้นงาน

(ฉ) นำชิ้นงานไปชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ด้วยความหนาแน่นกระแส 5 mA/cm² โดยให้แผ่นโลหะนิกเกิลเป็นขั้วแอโนด และแผ่นชิ้นงานเป็นขั้วแคโทด เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง หรือจนกว่ามวลนิกเกิลจะสูงเกินกว่าผิว SU-8

(ช) จากนั้นขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์เบอร์ 500 จนกระทั่งผิวของนิกเกิลและ SU-8 เรียบเสมอกัน เครื่องขัดจะกำหนดความเร็วงานขัดอยู่ที่ 70 รอบต่อนาที โดยใช้มือจับชิ้นงานและใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นระหว่างการขัดผิวชิ้นงาน จากนั้นขัดด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์เบอร์ 1,200 ตามเงื่อนไขเดียวกัน หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการขัดมัน ซึ่งขัดด้วย

ผ้าขัดชนิด DP Nap ซึ่งจะขัดด้วยผ้าขัดชนิด DP Nap ด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 1 μm และ 0.3 μm ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 2 ขั้นตอน มีเงื่อนไขการขัดเดียวกัน คือ จะใช้ความเร็วงานหมุนที่ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้มือจับชิ้นงาน

(ข) สกัดชั้น SU-8 100 ออกโดยการต้มในน้ำยา remover PG จากนั้นนำไปทำความสะอาดชิ้นงานด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ตามด้วยอะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ ตามด้วยคลื่นความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาที เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 95°C นาน 30 นาที ปลอ่ยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป

ภาคผนวก ค

กระบวนการสร้างข้าวอิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นกระจก

กระบวนการสร้างขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก

แสดงรายละเอียดขั้นตอนและลำดับกระบวนการสร้างขั้วอิเล็กโทรดบนแผ่นกระจก

(ก) แผ่นกระจกที่เจาะรูเรียบร้อยแล้ว นำไปทำความสะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ตามด้วยอะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ ตามด้วยคลื่นความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และกำจัดความชื้นบนผิวกระจกที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 30 นาที บนแผ่นความร้อน (hot plate) และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(ข) เคลือบฟิล์มโลหะ 3 ชั้น ด้วยไทเทเนียมหนาประมาณ 500 อังสตรอม ชั้นทองแดงหนาประมาณ 1,500 อังสตรอม และชั้นไทเทเนียมหนาประมาณ 500 อังสตรอม ตามลำดับ ด้วยกระบวนการระเหยไอในสุญญากาศ จากนั้นทำความสะอาดด้วยอะซิโตน ตามด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนและนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(ค) เคลือบสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดบวก AZ 1512 ด้วยความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาที ตามด้วยความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที และนำไปอบบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 10 นาที เพิ่มเป็นอุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(ง) ถ่ายแบบลวดลายโครงสร้างด้วยแสง UV ผ่านโฟโตมาสก์ลงบนสารไวแสงโฟโตริซิส เป็นเวลา 2 นาที 30 วินาที จากนั้นลอกสารไวแสงโฟโตริซิสส่วนที่ถูกฉายแสง ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

(จ) สกัดชั้นไทเทเนียมออก โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเจือจาง 5% และชั้นทองแดงออกในสารละลาย $[H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O]$ ในอัตราส่วน $[1 : 1 : 20]$ ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ และล้างสารไวแสงออกในอะซิโตน ตามด้วยน้ำบริสุทธิ์ก็จะได้ขั้วอิเล็กโทรด เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้ขั้วอิเล็กโทรด โดยการนำไปชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าบนชั้นของทองแดงด้วยความหนาแน่นกระแส 1 mA/cm² นาน 10 นาที ที่แต่ละด้านของขั้วอิเล็กโทรด เสร็จแล้วนำไปชุบทองด้วยไฟฟ้าบนชั้นของนิกเกิลด้วยความหนาแน่นกระแส 0.5 mA/cm² นาน 5 นาที แล้วนำไปทำความสะอาดตามกระบวนการในข้อ (ข)

ภาคผนวก ง

กระบวนการผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS

กระบวนการผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาคโดยใช้ซิลิโคน PDMS บนแผ่นฐานรองกราฟไฟต์

รายละเอียดขั้นตอนและลำดับกระบวนการผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาค โดยใช้ซิลิโคน PDMS บนแผ่นฐานรองกราฟไฟต์

(ก) นำแบบช่องทางเดินจุลภาคที่สร้างบนแผ่นฐานรองกราฟไฟต์ ที่ทำความสะอาดแล้ว มาทำบล็อกล้อมรอบทั้ง 4 ด้าน ด้วยแผ่นอะลูมิเนียมสูงประมาณ 1 เซนติเมตร และยึดด้วยเทปกาว เพื่อไม่ให้ของเหลวไหลออก

(ข) ผสม polydimethylsiloxane (PDMS) ในอัตราส่วน 1 : 15 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากัน ประมาณ 5 นาที นำเข้าโถดูดความชื้นนาน 1 ชั่วโมง เพื่อดูดฟองอากาศออก จากนั้นใช้น้ำมันมะกอกทาให้ทั่วแบบที่เตรียมไว้บาง ๆ รวมทั้งรอบแผ่นอะลูมิเนียมด้วย เพื่อเวลาลอก PDMS ออกจากแบบ จะได้ลอกได้ง่ายขึ้นทำให้ชิ้นงานไม่เสียหาย

(ค) เท PDMS ลงในแบบที่เตรียมไว้ โดยเทด้วยความระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศ นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(ง) ลอก PDMS ออกจากแบบด้วยความระมัดระวัง ใช้คัตเตอร์ตัดตกแต่งตามต้องการ จากนั้นนำ PDMS ที่เป็นช่องทางเดินจุลภาค ไปทำความสะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ตามด้วยอะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ ตามด้วยคลื่นความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง ส่วนแบบที่ทำด้วยนิกเกิลบนแผ่นฐานรองกราฟไฟต์ นำไปทำความสะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ตามด้วยอะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ หลังจากนั้นเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปใช้งานในครั้งต่อไป

รายละเอียดขั้นตอนและลำดับกระบวนการสร้างการผลิตซ้ำช่องทางเดินจุลภาค โดยใช้ ซิลิโคน PDMS บนแผ่นฐานรองกระจก

(ก) นำแบบของช่องทางเดินจุลภาคที่สร้างบนแผ่นฐานรองกระจก ที่ทำความสะอาดแล้ว มาทำบล็อกล้อมรอบทั้ง 4 ด้าน ด้วยแผ่นอะลูมิเนียมสูงประมาณ 1 เซนติเมตร และยึดด้วยเทปกาว เพื่อไม่ให้ของเหลวไหลออก

(ข) ผสม polydimethylsiloxane (PDMS) ในอัตราส่วน 1 : 15 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากัน ประมาณ 5 นาที นำเข้าโถดูดความชื้นนาน 1 ชั่วโมง เพื่อดูดฟองอากาศออก

(ค) เท PDMS ลงในแบบที่เตรียมไว้ โดยเทด้วยความระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศ นำเข้าโถดูดความชื้นอีกรอบประมาณ 30 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีฟองอากาศเหลืออยู่ จากนั้นนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

(ง) ลอก PDMS ออกจากแบบด้วยความระมัดระวัง ใช้คัตเตอร์ตัดตกแต่งตามต้องการ แล้วนำ PDMS ที่เป็นช่องทางเดินจุลภาค ไปทำความสะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ตามด้วยอะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ ตามด้วยคลื่นความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง ส่วนแบบที่ทำด้วยนิกเกิลบนแผ่นฐานรองกระจก หลังจากใช้แล้วนำไปทำความสะอาดด้วย ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ตามด้วยอะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ หลังจากนั้นจึงเป่าให้แห้งด้วย แก๊สไนโตรเจน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปใช้งานในครั้งต่อไป

ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

S. Seemungkoon and N. Chomnawang, “**Formation of Microchannel Based on Dry - film Photoresist/Glass Bonding Technique.**” Proceedings of the 2006 International Conference on Micro/Nano Fabrication Technologies, Bangkok, Thailand, May 10 – 12, 2006.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสาทิพย์ ศรีมุงคุณ เกิดเมื่อวันที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2524 เกิดที่อำเภอเมืองชัย จังหวัดกาฬสินธุ์ เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษา ที่โรงเรียนบัวสะอาดส่งเสริม จังหวัดกาฬสินธุ์ ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนแก่นนครวิทยาลัย จังหวัดขอนแก่น และสำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2545 และได้ศึกษาต่อระดับปริญญาโทในสาขาวิชาเดียวกัน

ขณะศึกษาระดับปริญญาโทได้เป็นผู้ช่วยสอนวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 4 รายวิชา เป็นระยะเวลา 5 ปี ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ (2) ปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน (4) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา ดังรายชื่อที่ปรากฏในภาคผนวก จ. โดยมีความสนใจทางด้านเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม