

โครงการที่ 811/2562 (วศบ.อุตสาหกรรม)



**ออกแบบช่องทางของไหลจุลภาคสำหรับการวิเคราะห์เซลล์เม็ดเลือดขาวในนมวัว
โดยใช้เทคนิคการจำลองสภาพการณ์**

นายวัชร ใจกล้า รหัสนักศึกษา 590612088

โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ปีการศึกษา 2562

หัวข้อโครงการ	ออกแบบช่องทางการไหลจุลภาคสำหรับการวิเคราะห์เซลล์เม็ดเลือดขาว
	ในนมวัวโดยใช้เทคนิคการจำลองสภาพการณ์
โดย	นายวัชร ใจกล้า รหัสนักศึกษา 590612088
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล
ปีการศึกษา	2562

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อนุมัติให้นับ
 โครงการนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

กรรมการสอบโครงการ

..... ประธานกรรมการ
 (รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล)

..... กรรมการ
 (ผศ.ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์วงศ์)

..... กรรมการ
 (ผศ.ดร.อรรถพล สมุทรคุปต์)

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้ามีความยินดีอย่างยิ่งที่ได้รับความรู้และประสบการณ์จาก รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า รายงานการค้นคว้าแบบอิสระฉบับนี้หากปราศจาก รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล แล้วนั้น จะไม่สามารถสำเร็จลงได้ รวมทั้งความคิดเห็นเกี่ยวกับการวิเคราะห์ข้อมูล การนำเสนอเทคนิคการใช้งานโปรแกรมใหม่ ที่ข้าพเจ้าไม่เคยเรียนรู้จากที่ไหนมาก่อน

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ผศ.ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์าวงศ์ และ ผศ.ดร.อรรถพล สมุทรคุปต์ ที่ช่วยแนะนำข้าพเจ้าตั้งแต่เรียนเข้ามาเรียนในภาควิชา ทั้งการเรียนเลคเชอร์และปฏิบัติการกับพวกท่าน ประสบการณ์ที่ข้าพเจ้าได้รับระหว่างการเรียนมหาวิทยาลัย ทำให้ข้าพเจ้ามีความพร้อม เพื่อทำงานในด้านวิศวกรรมต่อไปในอนาคต อีกทั้งหลังจากข้าพเจ้าจบจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่แล้วข้าพเจ้าสามารถกล่าวได้อย่างภาคภูมิใจว่าข้าพเจ้าเป็นวิศวกร นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ผศ.ดร. นิรุต ผุสดี และบุคลากรที่ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านฟิสิกส์ที่ให้การสนับสนุนในการรายงานการค้นคว้าแบบอิสระฉบับนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดาที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดูตลอดจนส่งเสริมการศึกษาในด้านวิชาการ อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจเป็นอย่างดีตลอดการเรียนและการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ทางข้าพเจ้าโครงการวิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โครงการวิจัยเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ หากโครงการวิจัยเล่มนี้บกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าต้องขออภัย และขอน้อมรับข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ทุกประการ

วัชร ใจกล้า

หัวข้อโครงการ	การออกแบบช่องทางการไหลจุลภาคสำหรับการวิเคราะห์เซลล์เม็ดเลือดขาว ในนมวัวโดยใช้เทคนิคการจำลองสภาพการณ์		
โดย	นายวัชร	ใจกล้า	รหัสนักศึกษา 590612088
ภาควิชา	วิศวกรรมอุสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล		
ปีการศึกษา	2562		

บทคัดย่อ

เนื่องจากนมวัวที่เกษตรกรนำไปจำหน่ายให้กลับโรงงาน ทางโรงงานจะมีเกณฑ์ในการรับซื้อนมวัวตามคุณภาพของน้ำนมที่นำมาขาย โดยหนึ่งในเกณฑ์ที่ใช้วัดคุณภาพนมวัวคือตรวจนับจำนวนเซลล์โซมาติก ซึ่งเป็นเซลล์เนื้อเยื่อ ได้แก่ เม็ดเลือดขาวและเยื่อบุผนังของท่อส่งนม หรือถูกพกน้ำนม การวัดปริมาณเม็ดเลือดขาวที่ปะปนอยู่ในนมวัวโดยยังมีเม็ดเลือดขาวมากเท่าไหร่งส่งผลให้คุณภาพของนมวัวแย่งลงเท่านั้นและหากมีปริมาณเม็ดเลือดขาวมากกว่า 500,000 เซลล์ต่อปริมาณนมวัว 1 มิลลิลิตร ทางโรงงานจะปฏิเสธน้ำนมวัวถึงขั้นทันที ทำให้เกษตรกรสูญเสียรายได้และไม่ทราบสาเหตุที่นมวัวคุณภาพแย่เกิดจากวัวตัวไหนเนื่องจากถังบรรจุนมวัว 1 ถังนั้นมาจากนมวัวหลายๆ ตัวและอาจเกิดกรณีที่มีการที่ทางโรงงานเปลี่ยนแปลงผลการทดสอบคุณภาพนมวัวเพื่อรับซื้อนมวัวถูกกว่าค่าคุณภาพของนมวัวที่ควรจะเป็น โดยงานวิจัยนี้แสดงถึงการจำลองสภาพการณ์ไหลของเซลล์เม็ดเลือดขาวของนมวัวภายในช่องทางการไหลแบบจุลภาคเพื่อเป็นแนวทางในการทำอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพนมวัวแบบพกพาที่เกษตรกรสามารถใช้ตรวจคุณภาพนมวัวได้ทันทีที่ทำการรีดนมวัวเสร็จ จากผลการศึกษาเชิงทฤษฎีพบว่าขนาดของช่องทางการไหลจุลภาคที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะใช้นับขนาดของเซลล์เม็ดเลือดขาวได้จึงต้องออกแบบช่องทางการไหลใหม่โดยใช้เทคนิคที่มีชื่อว่า Hydrodynamic focusing for microfluidic impedance cytometry เพื่อบังคับให้เซลล์เม็ดเลือดขาวไหลแบบเรียงตัวกันซึ่งทำให้สามารถตรวจวัดโดยใช้อุปกรณ์ช่องทางการไหลจุลภาคได้

Project Title	Design of Microfluidic Channel for Analyzing White Blood Cell in Milk by Using Simulation Technology		
Name	Watchara	Jaikla	Code 590612088
Department	Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University		
Project Advisor	Associate Professor Komgrit Leksakul, D.Eng.		
Academic Year	2562		

ABSTRACT

Due to the cow's milk that farmers sell to the factory the factory have the criteria for buying cow's milk according to the quality of the milk being sold. One of the criteria use to measure the quality of cow's milk is counts of somatic cells. which are tissue cells, such as white blood cells and the lining of the milk tube or breast milk bags. Measurement of the amount of white blood cells mixed in cow's milk, more. Then the white blood cells contribute to the quality of milk Cow only gets worse, and if the white blood cell volume is more than 500,000 cells per 1 milliliter of cow's milk. The factory will immediately reject that cow's milk. Causing farmers to lose income and do not know whether The reason why the cow's milk is of poor quality due to the cows tank containing 1 cow's milk comes from many cow's milk. And there may be cases where the factory changes the test results for cow's milk quality in order to buy cow's milk cheaper than the quality value of cow's milk that should be. This research demonstrated the simulated flow of white blood cells of cow's milk under In the microfluidic channel as a guideline for making a portable cow milk quality measuring device that farmers can use to inspect the quality of cow's milk immediately after milking the cows is completed. That the size of the Microfluidic Channel is too large to count white blood cells, must design a new flow channel using a technique called Hydrodynamic focusing for microfluidic impedance cytometry

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาปัญหาในการทำโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตการศึกษา	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความหมายของโซมาติกเซลล์	6
2.2 การวัดสภาพนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค C4D	7
2.3 การวัดโดย C4D และระบบการรับข้อมูล	11
2.4 งานวิจัยในอดีต	14
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการทำวิจัย	
3.1 ศึกษาวิธีตรวจวัดคุณภาพนมวัวที่ใช้กันในปัจจุบัน	16
3.2 ออกแบบช่องทางการไหลจุลภาคในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค	18
3.3 ทำการจำลองสภาพการณ์โดยใช้โปรแกรมคอมโซลฟิสิกส์	18
3.4 การสร้างท่อการไหล	18
3.5 การสร้างระบบตรวจวัด C4D	20
3.6 การทดลองวัดสัญญาณ C4D	21
3.7 ประเมินสาเหตุที่เกิดขึ้นและทำการเปรียบเทียบผล	22
3.8 หาแนวทางการปรับปรุงเมื่อทราบสาเหตุของปัญหา	22
3.9 ดำเนินการปรับปรุงตามแผน	22
3.10.สรุปผลและจัดทำรายงาน	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินการ	
4.1 ลักษณะการจำลองสภาพการณ์ภายในโปรแกรม	23
4.2 การสร้างขั้วไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดและต่อการไหล	26
4.3 ผลการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีระยะระหว่างขั้ว 100 ไมโครเมตรและมีกราวด์	27
4.4 ผลการวัดด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีระยะห่างระหว่างขั้ว 50 ไมโครเมตรและไม่มีกราวด์	29
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินการ	
5.1อภิปรายผลการทดลอง	32
5.2 สรุปผลการทดลอง	33
บรรณานุกรม	34
ประวัติผู้เขียน	35

สารบัญตาราง

	หน้า
1.1 จำนวนโคนมและผลผลิตน้ำมันดิบของไทย ปี 2557 – 2562	2
1.2 ปริมาณและมูลค่านมและผลิตภัณฑ์นมส่งออกของไทย ปี 2557 – 2561	3
2.1 ตารางเปรียบเทียบลำดับคะแนนและระดับเซลล์โซมาติกเซลล์ต่อมิลลิลิตร	7

สารบัญภาพ

	หน้า
1.1 ระบบตรวจวัดชนิดที่ชั่วไฟฟ้าเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ตรวจวัดไมโครฟลูอิดิกส์	4
1.2 กราฟแสดงผลการตรวจวัดน้ำผลไม้แต่ละชนิดของเทคนิค C4D	5
2.1 แสดงโซมาติกเซลล์ในน้ำมัน	7
2.2 ภาพตัดขวางของท่อการไหลและชั่วไฟฟ้า C4D	8
2.3 แสดงวงจรสมมูลของระบบตรวจวัด C4D	8
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log Z_{\text{cell}}$ กับ $\log f$	9
2.5 วงจรสมมูลของระบบตรวจวัด C4D แบบมีกราวด์	10
2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log Z_{\text{cell}}$ กับ $\log f$ หลังจากทำการปรับปรุงสมการ	10
2.7 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัด C4D กับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ กระแสแบบ High Bandwidth ไปเป็นสัญญาณของศักย์ไฟฟ้า	11
2.8 แผนภาพอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดในระบบการวัดแบบ C4D	12
2.9 ระบบ C4D ต่อเข้ากับอุปกรณ์ตรวจวัด	13
2.10 โครงสร้างทางเคมีของ PDMS ก่อนและหลังถูกอาบด้วยออกซิเจนพลาสมา	14
2.11 การปรับเปลี่ยนสมบัติความชอบน้ำของผิว PDMS ด้วยพลาสมาออกซิเจน	14
2.12 โครงสร้างทางเคมีของการเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างพื้นผิว PDMS กับ PDMS	14
3.1 ขั้นตอนการทำท่อการไหล	19
3.2 ระบบตรวจวัด C4D	20
3.3 แผนภาพสรุปการสร้างระบบตรวจวัด	21
3.4 ระบบอุปกรณ์ของเทคนิค C4D ในห้องปฏิบัติการ	21

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

4.1 การจำลองการไหลของอนุภาค	23
4.2 แสดงการจำลองการไหลโดยใช้ความดันเป็นตัวแปร	24
4.3 แสดงความเร็วในการไหลของอนุภาคภายในช่องทางการไหล	25
4.4 แสดงท่อการไหลที่มีขนาดแตกต่างกัน	26
4.5 แสดงลักษณะการตรวจวัดโดยใช้ขั้วไฟฟ้า	26
4.6 ลักษณะขั้วไฟฟ้า C4D และท่อการไหลที่สร้างได้	27
4.7 อนุภาคแกรไฟต์ที่ตรวจวัดได้และกราฟแสดงความสัมพันธ์	28
4.8 หยดน้ำมันละหุ่งผสมใน Tween- 20 ที่ตรวจวัดได้และกราฟแสดงความสัมพันธ์	29
4.9 อนุภาคแกรไฟต์แบบที่สองที่ตรวจวัดได้และกราฟแสดงความสัมพันธ์	30
4.10 หยดน้ำมันละหุ่งผสมใน Tween- 20 แบบที่สองที่ตรวจวัดได้และกราฟแสดงความสัมพันธ์	31

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำให้โครงการ

เนื่องจากนมวัวที่เกษตรกรนำไปจำหน่ายให้กลับโรงงาน ทางโรงงานจะมีเกณฑ์ในการรับซื้อ นมวัวตามคุณภาพของน้ำนมที่นำมาขาย โดยหนึ่งในเกณฑ์ที่ใช้วัดคุณภาพนมวัวคือตรวจนับจำนวน เซลล์โซมาติก ซึ่งเป็นเซลล์เนื้อเยื่อ ได้แก่ เม็ดเลือดขาวและเยื่อบุผนังของท่อส่งนม หรือถูกพักน้ำนม การวัดปริมาณเม็ดเลือดขาวที่ปะปนอยู่ในนมวัวโดยยังมีเม็ดเลือดขาวมากเท่าไหร่งส่งผลให้คุณภาพ ของนมวัวแย่งลงเท่านั้นและหากมีปริมาณเม็ดเลือดขาวมากกว่า 500,000 เซลล์ต่อปริมาณนมวัว 1 มิลลิลิตร ทางโรงงานจะปฏิเสธน้ำนมวัวถึงขั้นทันที ทำให้เกษตรกรสูญเสียรายได้และไม่ทราบว่ สาเหตุที่นมวัวคุณภาพแย่เกิดจากวัวตัวไหนเนื่องจากถั่วบรรจุนมวัว 1 ถังนั้นมาจากนมวัวหลายๆตัว และอาจจะมีกรณีที่ทางโรงงานเปลี่ยนแปลงผลการทดสอบคุณภาพนมวัวเพื่อรับซื้อนมวัวถูกกว่า คุณภาพของนมวัวที่ควรจะเป็น การตรวจเซลล์เม็ดเลือดขาวในนมวัวในปัจจุบันส่วนมากจะเป็นการ ตรวจนับด้วยเครื่องนับอัตโนมัติเป็นวิธีการที่ตรวจได้อย่างรวดเร็วและตรวจตัวอย่างที่มีจำนวนมาก โดยไม่เสียเวลา แต่มีข้อเสียคือเครื่องตรวจ มีราคาแพงและมีค่าใช้จ่ายสำหรับการบำรุงรักษาค่อนข้าง สูง การตรวจในแต่ละครั้งจะต้องมีจำนวน ตัวอย่างจำนวนมากพอและต้องทำภายในห้องปฏิบัติการที่ มีตัวอย่างน้ำนมส่งเข้ามาตรวจเป็นประจำ จึงจะคุ้มค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ยังจะต้องมีการทดสอบ มาตรฐานของเครื่องอยู่เสมอทั้งเป็นการทดสอบภายใน ห้องปฏิบัติการเองและห้องปฏิบัติการอื่นโดย ใช้ตัวอย่างที่ใช้สำหรับปรับค่าเครื่องเพื่อให้เครื่องสามารถ อ่านค่าได้อย่างถูกต้อง

โดยในปี 2557 ถึง 2561 จำนวนโคนมทั้งหมดของไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.82 ต่อปี และจำนวนแม่โครีดนมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.52 ต่อปี โดยในปี 2561 มีแม่ โครีดนม 276,321 ตัว เพิ่มขึ้นจาก 267,932 ตัว ของปี 2560 ร้อยละ 3.13 ส่วนผลผลิตน้ำนมดิบในช่วงปี 2557 - 2561 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.62 ต่อปี โดยปี 2561 มีผลผลิต 1,233,483 ตัน เพิ่มขึ้นจากปี 2560 ร้อย ละ 3.55 เนื่องจากมีลูกโคนมเกิดใหม่ในรอบปี

ซึ่งสามารถอ้างอิงได้จากข้อมูลในตาราง 1.1 และ จำนวนแม่โครีดนมเฉลี่ยในรอบปีมีจำนวนเพิ่มขึ้น ประกอบกับภาครัฐมีนโยบายพัฒนาคุณภาพน้ำนมโค เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต โดยเน้นไปที่อาหารในการเลี้ยงโคนมซึ่งส่งผลให้น้ำนมดิบมีปริมาณ เพิ่มขึ้นและมีคุณภาพดีขึ้น รวมทั้งราคาน้ำนมดิบอยู่ในเกณฑ์ดี จึงจูงใจให้เกษตรกรมีการพัฒนาการเลี้ยง โคนมโดยการบริหารจัดการฟาร์มที่เป็นระบบตามมาตรฐานฟาร์มที่ดีและมีประสิทธิภาพในการเลี้ยง การนำเข้าผลิตภัณฑนม ในแต่ละปีไทยนำเข้านมและผลิตภัณฑนมเป็นจำนวนมาก โดยในปี 2561 มีการนำเข้าผลิตภัณฑนมปริมาณ 245,800 ตัน มูลค่า 19,930 ล้านบาท ปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 237,437 ตัน ของปี 2560 ร้อยละ 3.52 แต่มูลค่าลดลงจาก 20,581 ล้านบาท ของปี 2560 ร้อยละ 3.16 เนื่องจากราคานมและผลิตภัณฑนมในตลาดโลกปรับตัวลดลง ซึ่งนมผงขาดมันเนยเป็นผลิตภัณฑนมนำเข้าที่สำคัญ และมีสัดส่วนการนำเข้าสูงกว่าผลิตภัณฑนมนำเข้าอื่น ๆ เพราะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง โดยในปี 2561 มีการนำเข้านมผงขาดมันเนย 65,675 ตัน มูลค่า 4,218 ล้านบาท ปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 64,345 ตัน ของปี 2560 ร้อยละ 2.07 แต่มูลค่าลดลงจาก 5,204 ล้านบาท ของปี 2560 ร้อยละ 18.95 ความต้องการบริโภค ปี 2562 คาดว่าการบริโภคน้ำนมและผลิตภัณฑนมของโลกจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณผลผลิตน้ำนมดิบของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และการเติบโตทางเศรษฐกิจที่ลดลงของประเทศผู้นำเข้าหลัก ส่งผลให้ความต้องการนำเข้าเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง

ตาราง 1.1 จำนวนโคนมและผลผลิตน้ำนมดิบของไทย ปี 2557 - 2562

รายการ	2557	2558	2559	2560	2561	อัตราเพิ่ม (ร้อยละ)	2562
โคนมทั้งหมด ณ 1 ม.ค.(ตัว)	519,700	608,094	626,171	645,261	660,155	2.82	670,950
แม่โครีดนม ณ 1 ม.ค.(ตัว)	256,585	267,182	279,456	267,932	276,321	1.52	281,621
ผลผลิตน้ำนม ดิบ (ตัน)	1,143,789	1,179,338	1,193,737	1,191,143	1,233,483	1.62	1,332,180
อัตราการให้นมของแม่โค (กก./ตัว/วัน)	12.21	12.09	11.67	12.18	12.23	0.11	12.96
การบริโภค นม(ตัน)	1,143,789	1,179,338	1,193,737	1,191,143	1,233,483	1.62	1,332,180

ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2562)

จากมูลค่าการส่งออกสินค้าและผลิตภัณฑ์ของไทยภายใต้เอฟทีเอ (Free Trade Area ; FTA) พบว่า ในปี 2561 ไทยมีมูลค่าส่งออก 437.8 ล้านเหรียญสหรัฐ ขยายตัวร้อยละ 3.258 เมื่อเทียบกับปี 2555 ซึ่งเป็นปีก่อนที่ความตกลงเอฟทีเอฉบับแรกของไทยที่ทำกับอาเซียนจะมีผลบังคับใช้ โดยมูลค่า การ ส่งออกและผลิตภัณฑ์ภายใต้เอฟทีเอ คิดเป็นร้อยละ 92 ของการส่งออกสินค้าและผลิตภัณฑ์ของ ไทยไปทั่วโลก โดยอาเซียนและจีนเป็นตลาดที่ไทยส่งออกสินค้าและผลิตภัณฑ์ เพิ่มขึ้นมากที่สุด โดยในปี 2561 ขยายตัวร้อยละ 3.389 และร้อยละ 5.550 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปีก่อนที่ไทยทำความตกลงเอฟทีเอ (FTA) ซึ่งสามารถอ้างอิงได้จากข้อมูลในตาราง 1.2

ตาราง 1.2 ปริมาณและมูลค่าและผลิตภัณฑ์ส่งออกของไทย ปี 2557 - 2561

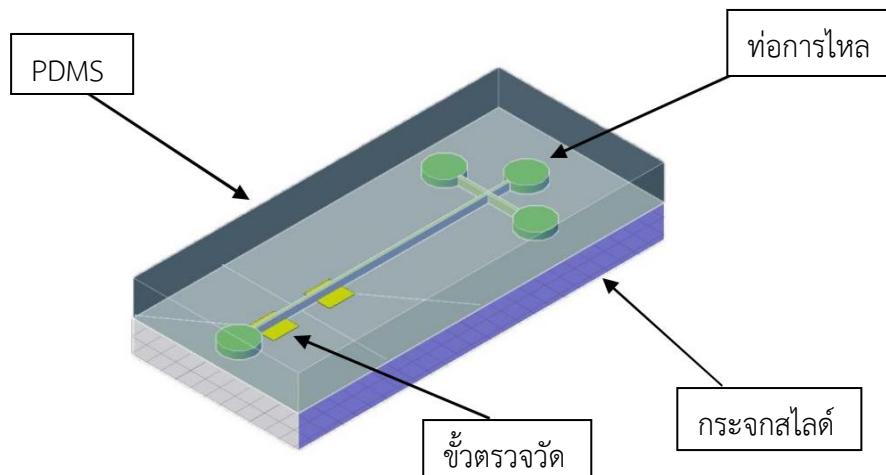
ปี	นมผงขาดมันเนย		นมและผลิตภัณฑ์นม		รวม	
	ตัน	พันบาท	ตัน	พันบาท	ตัน	พันบาท
2557	791	116,927	196,885	7,956,584	197,676	8,073,511
2558	1,884	134,451	215,404	9,086,981	217,288	9,211,432
2559	8,075	418,514	229,279	9,493,162	237,354	9,911,676
2560	9,710	539,652	267,253	9,773,517	276,963	10,313,169
2561	11,847	538,138	293,800	10,171,544	305,647	10,709,682

ที่มา : กรมศุลกากร (2561)

ปัจจุบันการศึกษาและพัฒนาเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดสารระดับจุลภาคกำลังเป็นที่สนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อดีหลายๆด้านและใช้สารตรวจวัดในปริมาณเพียงเล็กน้อยมีความไว (sensitivity) ในการตรวจวัดสูงสะดวกในการใช้งาน ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลองและการ ดูแลรักษา ในงานวิจัยนี้ได้สนใจศึกษาเทคนิคการวัดสภาพนำไฟฟ้าชนิดไร้สัมผัสแบบคู่ควบด้วย ตัวเก็บประจุ(Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection C4D, technique) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ใช้ตรวจวัดสารในระดับจุลภาค นอกจากจะมีข้อดีดังที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้วเทคนิคนี้ยังมีข้อดีคือสารละลายตัวอย่างจะไม่เกิดการปนเปื้อนในขณะที่ทำการตรวจวัดด้วย

ทำให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำมากขึ้น C4D เป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจวัดสารละลายในอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์โดยใช้ขั้วไฟฟ้าสองขั้วจะตรวจวัดสารละลายที่ไหลผ่านท่อขั้วแรกจะทำหน้าที่ให้สัญญาณกระตุ้น(Excitation frequency) ส่วนขั้วที่สองจะทำการรับสัญญาณ(Pick-up electrode) จากขั้วแรกก่อนที่กระแสไฟฟ้าจากขั้วแรกจะไหลเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าที่สอง กระแสจะวิ่งผ่านสารละลายในท่อการไหลซึ่งจะกระทำตัวเสมือนตัวนำที่มีความต้านทานคงที่ค่าหนึ่ง กระแสที่วัดได้ในขั้วที่สองจึงสามารถบ่งบอกถึงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายได้นอกจากนี้ยังสามารถตรวจวัดได้ทั้งสารละลายที่มีประจุและไม่มีประจุ

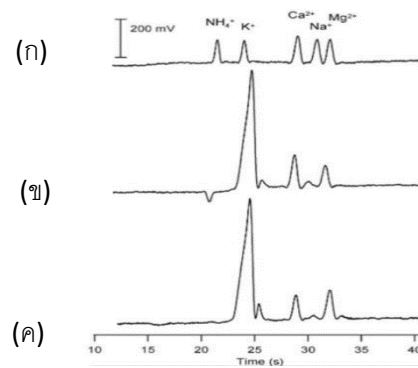
การสร้างระบบตรวจวัดสำหรับตรวจวัดของเทคนิค C4D ในปัจจุบันนิยมสร้างขึ้นในลักษณะชิปขนาดเล็กและมีท่อการไหลระดับไมโครเมตร โดยข้อไฟฟ้าจะเป็นส่วนหนึ่งในอุปกรณ์ตรวจวัดไมโครฟลูอิดิกส์ดังภาพ 1.1 ลักษณะวงจรของข้อตรวจวัดจะติดอยู่บนฐานของชิปส่วนท่อการไหลจะอยู่เหนือข้อไฟฟ้าขึ้นไปเล็กน้อย เจาะรูบริเวณปลายของท่อเพื่อเป็นทางเข้าออกของสารละลาย



ภาพ 1.1 ระบบตรวจวัดชนิดที่ข้อไฟฟ้าเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ตรวจวัดไมโครฟลูอิดิกส์

เทคนิค C4D ถูกนำไปใช้ในการตรวจวัดที่หลากหลายเช่น การวิเคราะห์สิ่งปนเปื้อนในอาหาร การวิเคราะห์ยาปลอมการตรวจสิ่งปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเช่นสารปนเปื้อนตะกั่ว ภาพ 1.2 (ก) แสดงตัวอย่างการตรวจวัดของน้ำผลไม้ชนิดต่างๆ ณ ตำแหน่งเดียวกันน้ำผลไม้มีไอออนชนิดเดียวกันกับกราฟมาตรฐานกราฟ (ข) และ (ค) มีจุดยอด ณ ตำแหน่งเดียวกับกราฟมาตรฐาน แสดงว่าในน้ำผลไม้มี ไอออนบวกชนิดเดียวกับกราฟมาตรฐาน

เทคนิค C4D ส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดสารละลาย แต่ในส่วนของการตรวจวัดอนุภาคขนาดเล็กยังไม่มีเผยแพร่ในวารสารวิชาการ การศึกษาค้นคว้าวิจัยจึงสนใจศึกษา การตรวจวัดอนุภาคขนาดเล็กหรือเซลล์เม็ดเลือดขาวภายในน้ำนมวัวด้วยเทคนิค C4D



ภาพ 1.2 กราฟแสดงผลการตรวจวัดน้ำผลไม้แต่ละชนิดของเทคนิค C4D (ก) กราฟมาตรฐานที่ทำการ ตรวจวัดไอออนบวกของธาตุ (ข) กราฟแสดงผลการตรวจวัดน้ำแอปเปิ้ล (ค) กราฟของ น้ำส้ม

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ออกแบบช่องทางการไหลจุลภาคสำหรับการวัดปริมาณเซลล์เม็ดเลือดขาวในนมวัว
- 1.2.2 ทำการจำลองสถานการณ์เพื่อสังเกตพฤติกรรมการไหล

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ออกแบบช่องทางการไหลจุลภาคโดยใช้โปรแกรมโซลิดเวิร์ค (Solid work)
- 1.3.2 สร้างแบบจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรมคอมโซลฟิสิกส์ (Comsol Physics)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถออกแบบอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดคุณภาพนมวัว
- 1.4.2 เกษตรกรสามารถนำอุปกรณ์ที่ออกแบบไปใช้ตรวจวัดคุณภาพนมวัวได้จริง

1.5 เนื้อหาของโครงงานวิจัย

- 1.5.1 เนื้อหามีทั้งหมดห้าบท
- 1.5.2 บทแรกจะบอกที่มาของปัญหาที่มาของโครงงานวิจัย
- 1.5.3 บทที่สองเกี่ยวกับประโยชน์ของโครงงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน
- 1.5.4 บทที่สามเกี่ยวข้องกับขั้นตอนในการทำโครงงาน
- 1.5.5 บทที่สี่จะบอกผลการทดลองที่ได้ทำในโครงงานวิจัย
- 1.5.6 บทที่ห้าบอกถึงสรุปผลการวิจัย

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่ใช้ในโครงการ

2.1.1 ทฤษฎีการวัดไข้ไฟฟ้าด้วยเทคนิค C4D เป็นการวัดหาค่าความต่างศักย์ของสสารที่ไหลผ่านท่อโดยใช้ไข้ไฟฟ้า

2.1.2 ทฤษฎีการแปลงผลจากสัญญาณคลื่นไฟฟ้าเป็นการจัดการกับสัญญาณรบกวนอื่นและแปลงเป็นค่าที่สามารถอ่านค่าจากกราฟได้

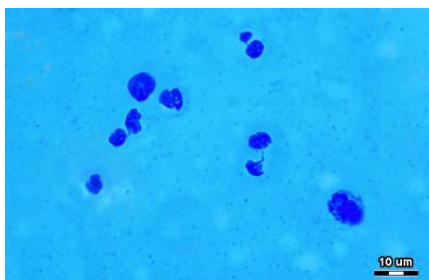
2.2 ความหมายของโซมาติกเซลล์

2.2.1 เซลล์โซมาติก

เป็นเนื้อเยื่อประกอบด้วย เม็ดเลือดขาว และเยื่อบุผนังของท่อส่งนมหรือ ถุงพักน้ำนมซึ่งหลุดลอกปนในน้ำนมขณะที่รีดนมออกมา ปริมาณของเซลล์โซมาติกจะเป็นตัวบ่งบอก คุณภาพของน้ำนมวัว ถ้าสภาพของเต้านม รังนมและถุงพักน้ำนมเป็นปกติปริมาณเซลล์จะต่ำ เมื่อมีการติด เอเกิดขึ้น ร่างกายจะสร้างเม็ดเลือดขาว (Polymorphonuclear) เพื่อทำลายเชื้อโรคขณะเดียวกันเนื้อเยื่อ บุเต้านม ท่อน้ำนมที่ถูกเชื้อโรคทำลายจะอ่อนแอและมีการหลุดลอกมากขึ้นนอกจากนี้การหลุดลอกของเนื้อเยื่อที่มากขึ้นยังสามารถเกิดได้จากการรีดนมที่ผิดวิธี การใช้เครื่องรีดนมวัวที่มีความดันสูงเกินไป หรือมี จังหวะรีดนมที่ไม่เหมาะสม

2.1.2 ประโยชน์ที่ได้จากการตรวจนับเซลล์

ทำให้ทราบความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับเต้านม ซึ่งทำให้สามารถดูแลจัดการฝูงโคนมได้ทันทีวงที่ก่อนแสดงอาการ ในปัจจุบันเกษตรกรที่เลี้ยงโคนมเป็นจำนวนมากจะมีปัญหาในการดูแลและจัดการฝูงโคนม จึงต้องใช้วิทยาการนี้ช่วยหากโคนมตัวใดให้นมที่มีเซลล์สูง ก็จะเก็บตัวอย่างน้ำนมส่งตรวจ ทางจุลชีววิทยาขณะเดียวกันก็จะแยกโคนมนั้นไว้รีดนมทีหลังเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรคที่ อาจทำให้เกิดเต้านมอักเสบไปสู่โคนมตัวอื่นๆในฝูง เซลล์โซมาติกดังภาพ 2.1 สามารถเป็นตัวชี้วัดในการ ควบคุมเต้านมอักเสบชนิดไม่แสดงอาการ หากเป็นน้ำนมรวมของฝูงจะต้องมีค่าไม่เกิน 500,000 เซลล์ต่อ มิลลิลิตร และถ้าเป็นนมวัวรายตัวต้องมีค่าไม่เกิน 250,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร



ภาพ 2.1 แสดงโซมาติกเซลล์ในน้ำนม

ที่มา : <http://vet.kku.ac.th>

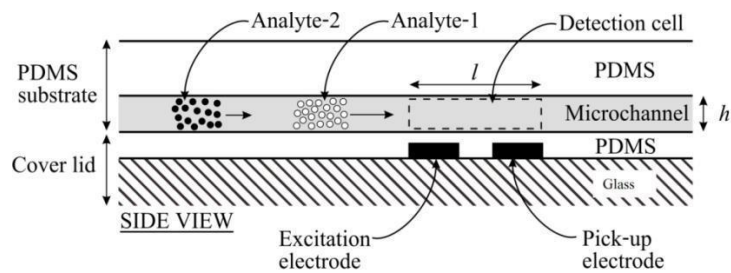
กรมปศุสัตว์มีห้องปฏิบัติการตรวจคุณภาพน้ำนมอยู่ทุกภาคของประเทศให้บริการตรวจน้ำนมราย ฟาร์มทุกเดือน หากเกษตรกรประสงค์จะส่งตัวอย่างโครายตัวสามารถส่งตัวอย่างเพิ่มได้ ในการจัดการ ฟาร์มโดยเซลล์โซมาติกควรมีเป้าหมายดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 ตารางเปรียบเทียบลำดับคะแนนและระดับเซลล์โซมาติกเซลล์ต่อมิลลิลิตร

ลำดับคะแนน	ระดับเซลล์โซมาติกต่อมิลลิลิตร	เปอร์เซ็นต์โคนมที่พบเซลล์ในฝูง
1	<25,000	10
2	>25,000-50,000	30
3	>50,000-100,000	40
4	>100,000-200,000	5
5	>200,000-400,000	5
6	>400,000-800,000	4
7	>800,000-1,600,000	4
8	>1,600,000	2

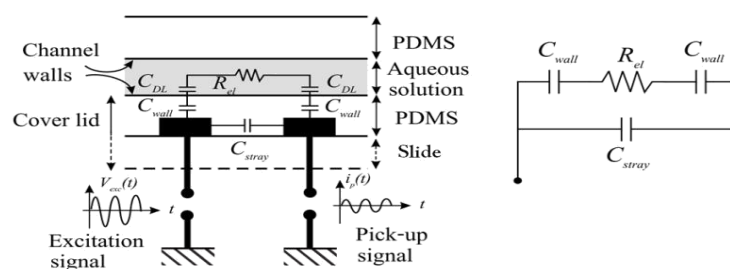
2.3 การวัดสภาพนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค C4D

ในการวัดด้วยเทคนิคC4D จะใช้ขั้วไฟฟ้าสองขั้วสำหรับตรวจวัดโดยทั้งสองขั้วจะถูกวาง อยู่ใต้ท่อการไหลและไม่สัมผัสกับสารละลายดังแสดงในภาพ 2.2 โดยจะมีขั้วหนึ่งทำหน้าที่ให้สัญญาณไฟฟ้ากระตุ้น (Excitation electrode) ส่วนขั้วไฟฟ้าอีกขั้วทำหน้าที่รับสัญญาณ (Pick-up electrode) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายในท่อไมครอน



ภาพ 2.2 ภาพตัดขวางของท่อการไหลและขั้วไฟฟ้า C4D

เมื่อพิจารณาระบบของการวัดแบบ C4D บริเวณรอยต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และผนังจะเกิดปรากฏการณ์ Electrical Double Layers (EDL) ซึ่ง EDL จะกระทำตัวเสมือนตัวเก็บประจุ (CDL) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ในท่อจะทำตัวเสมือนตัวนำที่มีค่าความต้านทานค่าหนึ่งผนังซึ่งทำจาก Polydimethylsiloxane (PDMS) มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กทริกส์สามารถพิจารณาเป็นตัวเก็บประจุ และเนื่องจากการคู่ควบของขั้วไฟฟ้าทั้งสองทำให้ขั้วไฟฟ้าทำตัวเสมือนตัวเก็บประจุ วงจรสมมูลของระบบตรวจวัด C4D แสดงดังภาพ 2.3



ภาพ 2.3 แสดงวงจรสมมูลของระบบตรวจวัด C4D

ค่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านขั้วไฟฟ้าคือ

$$i = \frac{V_{ext}}{Z_{cell}} \quad (2.1)$$

i คือ กระแสลัดที่ผ่านขั้วไฟฟ้า

V_{ext} คือ ค่าความต่างศักย์ที่ให้แกขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

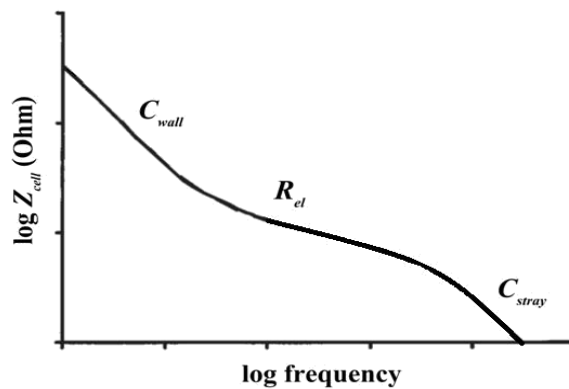
Z_{cell} คือ ค่าความต้านทานกระแสลัดของของระบบตรวจวัด

จากวงจรสมมูลดังกล่าวความต้านทานกระแสสลับสามารถเขียนได้ในสมการ 2.2

$$Z_{cell} = \frac{R_{el} + \left(\frac{1}{j\omega C_{wall}}\right)}{jR_{el}2\pi f C_{stray} + 2\frac{C_{stray}}{C_{wall}} + 1} \quad (2.2)$$

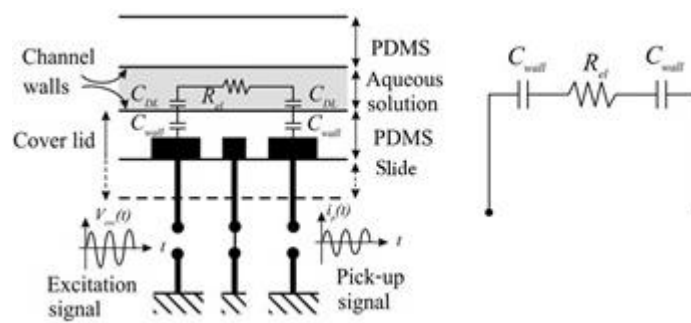
โดยที่ f คือความถี่กระตุ้น (excitation frequency)

ค่าความต้านทานกระแสสลับรวมของระบบตรวจวัดขึ้นอยู่กับความถี่กระตุ้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z_{cell} กับความถี่กระตุ้น แสดงดังภาพ 2.4



ภาพ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log Z_{cell}$ กับ $\log f$

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อให้ความถี่ค่าสูงแก่วงจร ความต้านทานกระแสสลับจะลดลงเข้าสู่ศูนย์ซึ่งเป็นผลมาจาก C_{stray} ที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ค่าความต้านทานของสารละลายที่วัดได้ไม่ควรขึ้นกับความถี่ที่ใช้ในการวัดเพราะสัญญาณที่เปลี่ยนไปควรจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานเท่านั้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารละลาย ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใส่สายกราวด์เข้าไประหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเพื่อกำจัด C_{stray} ดังภาพ 2.5



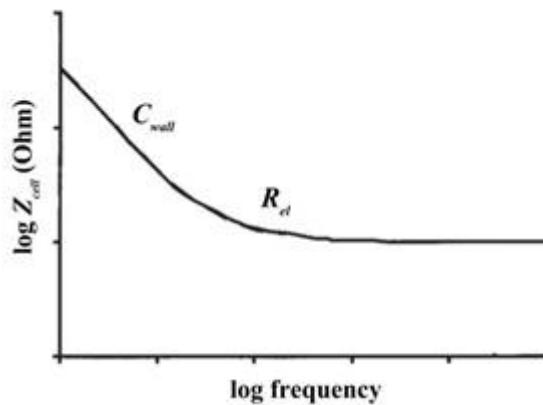
ภาพ 2.5 วงจรสมมูลของระบบตรวจวัด C4D แบบมีกราวด์

หลังจากที่เพิ่มกราวด์เข้าไปในวงจรแล้วค่าความต้านทานกระแสสลับของวงจรสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$Z_{cell} = \sqrt{R_{el}^2 + \left(\frac{1}{\pi f c_{DL}}\right)^2} \quad (2.3)$$

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log Z$ กับ $\log f$ ในรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าเมื่อให้ความถี่ค่าสูงแก่วงจร จะส่งผลให้ค่าความต้านทานกระแสสลับของวงจรมีค่าคงที่เท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระบบตรวจวัดคือ

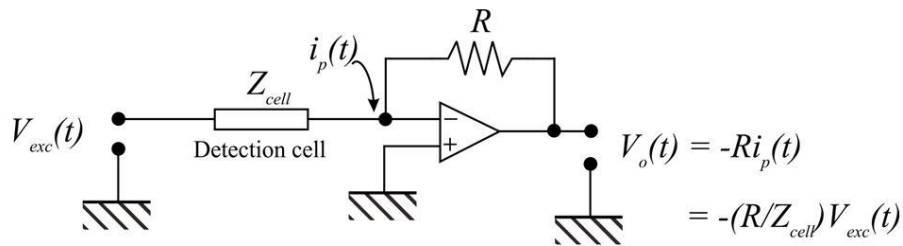
$$i = \frac{V_{ext}}{\sqrt{R_{el}^2 + \left(\frac{1}{\pi f c_{wall}}\right)^2}} \quad (2.4)$$



ภาพ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log Z_{cell}$ กับ $\log f$ หลังจากทำการปรับปรุงสมการ

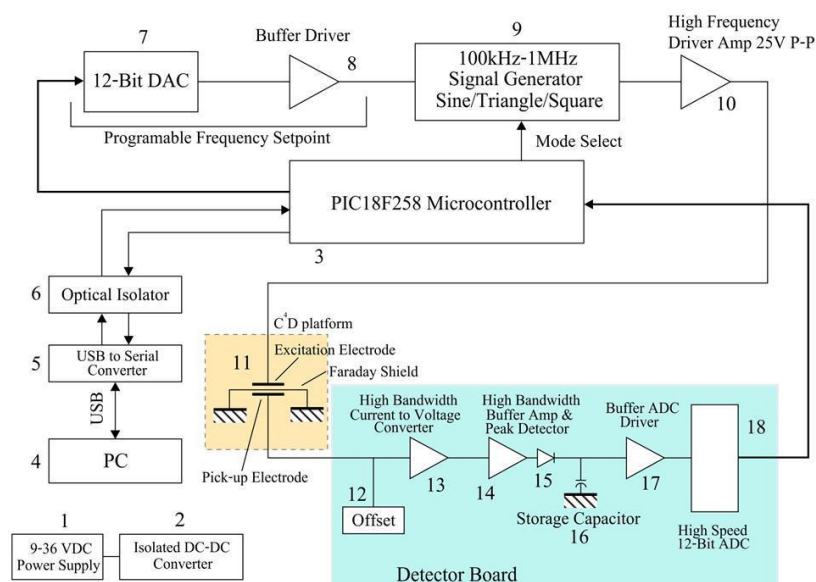
2.4 การวัดโดย C4D และระบบการรับข้อมูล

อุปกรณ์ที่ให้สัญญาณกระตุ้นและรับข้อมูลของระบบ C4D ถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมควบคุมและการเก็บข้อมูล C4D ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นภายในหน่วยวิจัยฟิสิกส์ของไหลจุลภาคศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยมีกระบวนการดังภาพ 2.6 กระแสสลับ $i_p(t)$ จากขั้วไฟฟ้ากระตุ้น (excitation electrode) จะเคลื่อนที่ผ่านไปยังอนุภาคที่ถูกตรวจวัดซึ่งมีความต้านทานกระแสสลับ Z สัญญาณที่ออกมาจากอนุภาคจะไปยังขั้วรับสัญญาณและใช้ Operational Amplifier ที่เหมาะสมซึ่งจะแปลงสัญญาณจากกระแสไฟฟ้าไปเป็นความต่างศักย์ $V_0(t)$ ตามความสัมพันธ์ $V_0(t) = -i_p(t)R$ อุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงอยู่ส่วนหน้าของ detector board ดังภาพ 2.7



ภาพ 2.7 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัด C4D กับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ กระแสแบบhigh bandwidth ไปเป็นสัญญาณของศักย์ไฟฟ้า

สัญญาณความต่างศักย์จะผ่านเข้าสู่หน่วยอิเล็กทรอนิกส์ดังภาพ 2.8 ขั้นตอนและหน้าที่ของอุปกรณ์ต่างๆสามารถพิจารณาได้จากภาพ 2.8 PIC18F258 microcontroller (3) เป็นอุปกรณ์ที่รับชุดคำสั่ง (programmable) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกสัญญาณรบกวนได้ง่าย PIC18F258 microcontroller จะต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ (4) โดยใช้ USB port เป็นตัวเชื่อมต่อ Optical isolator (6) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับป้องกันสัญญาณรบกวนจาก PC ground และ PC electronics เครื่องคอมพิวเตอร์จะส่งสัญญาณดิจิทัลไปยัง PIC18F258 (3) และ 12-bit DAC (7, ตัวแปลงจากดิจิทัลไปเป็นอนาล็อก) จะรับสัญญาณต่ออีกทอดหนึ่ง สัญญาณดิจิทัลจะถูกแปลงไปเป็นสัญญาณอนาล็อกเพื่อใช้ขับเคลื่อนตัวเกิดสัญญาณ (9) โดยผ่านส่วน buffer driver (8)



ภาพ 2.8 แผนภาพอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดในระบบการวัดแบบ C4D

สัญญาณความต่างศักย์ความถี่สูงที่สร้างจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (9) จะถูกส่งไปยัง high frequency voltage driver amplifier (10) หลังจากนั้นความต่างศักย์ 25 VP-P หรือสัญญาณกระตุ้นจะถูกส่งไปยังขั้วที่ถูกระตุ้นของ detection cell (11) จากนั้นอุปกรณ์ตรวจวัด C4D จะทำการตรวจวัดโดยให้กระแสไฟฟ้าเดินทางผ่านท่อการไหลสู่ขั้วไฟฟ้ารับสัญญาณ (pick up electrode) สัญญาณกระแสที่วัดได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณความต่างศักย์ (13) และส่งต่อไปยัง high bandwidth buffer amplifier (14) เพื่อทำการขยายสัญญาณ นอกจากนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนระดับสัญญาณได้โดย offset (12) หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยัง filter part (15) และ (16) และส่งไปยังส่วน buffer ADC driver (17) ซึ่งขั้นตอนนี้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะทำการกรองสัญญาณ โดยจะให้สัญญาณบวกผ่านไปที่นั่น สัญญาณจะถูกส่งไปขับเคลื่อน high speed 12-bit ADC (18, ตัวแปลงจากอนาล็อกไปเป็นดิจิทัล)และทำการแปลงสัญญาณความต่างศักย์ไปเป็นสัญญาณดิจิทัลนั้น จะส่งสัญญาณไปยัง PIC18F258 และเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ (4) ตามลำดับซึ่งโปรแกรมควบคุมและการเก็บข้อมูล C4D จะแสดงสัญญาณดังกล่าวใน real-time electropherogram ในหน้าต่างแสดงผลข้อมูลสัญญาณและยังสามารถบันทึกเป็น text file ในคอมพิวเตอร์ได้ดังภาพ 2.9

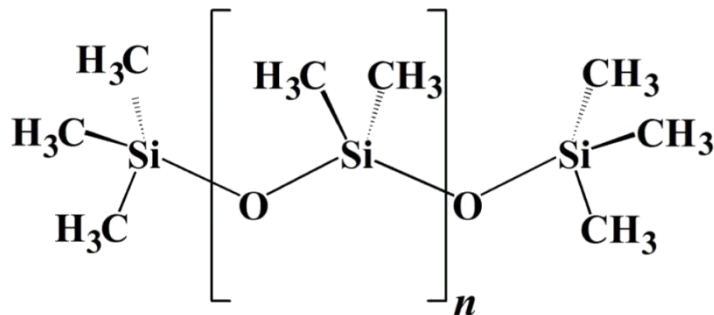


ภาพ 2.9 ระบบ C4D ต่อเข้ากับอุปกรณ์ตรวจวัด

จากทฤษฎีดังกล่าวจะนำมาปรับใช้โดยการใส่ขั้วตรวจวัดไปภายในท่อการไหลจุลภาคเพื่อให้ขั้วไฟฟ้าสามารถตรวจวัดเซลล์เม็ดเลือดขาวที่ไหลผ่านท่อได้และแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องคัดกรองสัญญาณเพื่อให้สามารถอ่านค่าได้ในขั้นตอนที่ (4.2)

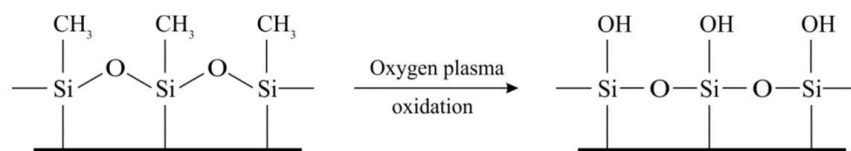
2.5 การปรับสมบัติความชอบน้ำและการประกบติดอย่างถาวรของผิว PDMS ด้วยพลาสมา

ท่อการไหลของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบ C4D สร้างมาจาก PDMS ซึ่งเป็นสารโพลีเมอร์ คุณสมบัติที่ดีหลายด้านคือ มีความเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทนต่อความร้อน ไม่เป็นพิษและมีความโปร่งแสง สูตรเคมีของ PDMS คือ $\text{CH}_3(\text{SiOCH}_3)_n\text{CH}_3$ และมีโครงสร้างทางเคมีแสดงดังภาพ 2.10 จะเห็นว่าพันธะของ $-\text{CH}_3$ (methyl groups) เป็นพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ทำให้มีความเฉื่อยในการเกิดปฏิกิริยาและทำให้ PDMS มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ PDMS นอกจากจะถูกนำมาใช้สร้างท่อการไหลแล้วยังถูกนำมาใช้เคลือบเป็นชั้นบางๆ ให้ขั้วไฟฟ้าตรวจวัดก่อนจะนำชิ้นส่วนทั้งสองมาประกบเข้าด้วยกัน

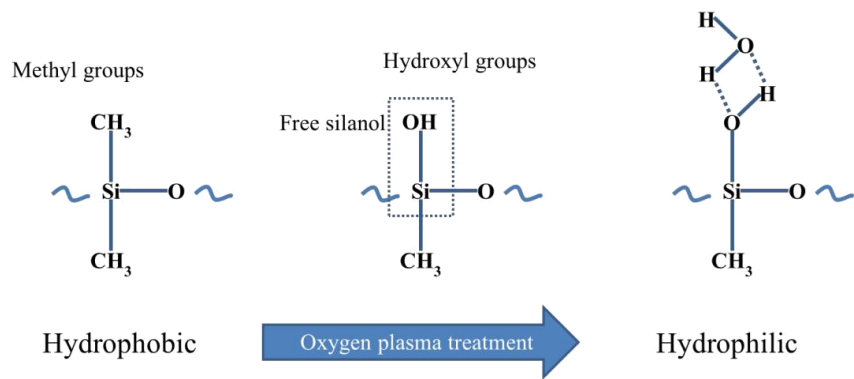


ภาพ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของ PDMS

การสร้างอุปกรณ์ตรวจวัด C4D ขั้นตอนการประกบกันระหว่างท่อการไหลและขั้วไฟฟ้าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัด C4D ซึ่งจะต้องทำให้ชิ้นส่วนทั้งสองข้างต้นเชื่อมกันในระดับพันธะเคมี สามารถทำได้โดยการนำชิ้นส่วนทั้งสองไปอาบออกซิเจนพลาสมา จากนั้นจึงนำมาประกบติดกัน ออกซิเจนพลาสมาจะทำลายพันธะของ $-\text{CH}_3$ บนผิวของ PDMS และแทนที่ด้วยพันธะ $-\text{OH}$ (Hydroxyl groups) ดังแสดงในภาพ 2.11 จะเห็นว่าพันธะของ $-\text{OH}$ เป็นพันธะไอออนิกมีแรงยึดเหนี่ยวของพันธะไม่มากนักทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ง่ายและทำให้ท่อการไหลมีคุณสมบัติการชอบน้ำ ดังภาพ 2.12

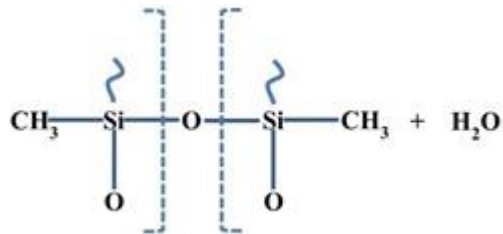


ภาพ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของ PDMS ก่อนและหลังถูกอาบด้วยออกซิเจนพลาสมา



ภาพ 2.12 การปรับเปลี่ยนสมบัติความชอบน้ำของผิว PDMS ด้วยพลาสมาออกซิเจน

เมื่อนำขั้วไฟฟ้ามาประกบกับท่อการไหล Hydroxyl groups บริเวณผิวของ PDMS จะเกิดพันธะโคเวเลนต์ Si-O-Si ระหว่างผิวสัมผัสของ PDMS ทั้งสอง ดังภาพ 2.13 ทำให้ขั้วไฟฟ้ากับท่อการไหลเชื่อมต่อกันอย่างถาวร การเชื่อมต่อกันในระดับพันธะจะเกิดได้ดีเมื่อ PDMS ของชิ้นส่วนทั้งสองมีพื้นผิวที่เรียบ



ภาพ 2.13 โครงสร้างทางเคมีของการเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างพื้นผิว PDMS กับ PDMS

จากทฤษฎีดังกล่าวสามารถนำมาปรับใช้กับโครงงานได้โดยการนำแผ่นสไลด์ไปฉายรังสีพลาสมาในเครื่องสุญญากาศเป็นเวลาหนึ่งนาทีก่อนเพื่อให้แผ่นสไลด์และซิลิโคนสามารถประกบเข้ากันได้ดังขั้นตอนที่ (3.5)

2.6 งานวิจัยในอดีต

โครงงานวิจัยของจิรายุส บุรณะพงศ์ (2558) เรื่องการพัฒนาระบบของไหลจุลภาคเพื่อการแยก เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียโดยอาศัยหลักการไดอิเล็กโตรโฟเรติกและแมกนีโตโฟเรติก งานวิจัย นี้ได้พัฒนาระบบการแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อมาลาเรียในระบบของไหลจุลภาค ซึ่งอาศัยทั้งแรง แมกนีโตโฟเรติกและแรงไดอิเล็กโตรโฟเรติก ระบบนี้จะช่วยให้การวินิจฉัยโรคมาลาเรียด้วยกล้องจุลทรรศน์ง่ายขึ้น ซึ่งน่าจะช่วยลดระยะเวลาในการวินิจฉัยได้ในระบบดังกล่าว แม้หลักการถูกนำมาใช้ สร้างแรงแมกนีโตโฟเรติก ในขณะที่อิเล็กโตรดถูกนำมาใช้สร้างแรง

ได้อิเล็กโทรฟอเรติก ในเบื้องต้น ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการแยกเซลล์ด้วยเทคนิคที่น่าเสนอ จาก การศึกษาพบว่าระบบดังกล่าวจะสามารถดึงให้เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อเข้าหาพื้นของช่องการไหลได้ ที่สภาวะที่เฉพาะเจาะจงหนึ่งๆ ในขณะที่เซลล์อื่นๆถูกผลักออกจากพื้นของช่องการไหลได้ หลังจากนั้น การทดลองเพื่อประเมินความสามารถของระบบได้ถูกดำเนินการโดยใช้อุณหภูมิแม่เหล็กเป็นตัวแทนของ เซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อ ในขณะที่อุณหภูมิพลาสติกถูกใช้เป็นตัวแทนของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ไม่ติดเชื้อ เพื่อลดปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ใน การทดลอง

งานวิจัยของอำพล กำเนิดสุข (2560) เรื่องการคัดแยกอนุภาคตามขนาดด้วยอุปกรณ์การไหลที่มี ท่อหน้าตัดแบบย่อและขยายสองส่วน เป็นการทดลองเพื่อออกแบบอุปกรณ์การไหลที่มีท่อหน้าตัดแบบย่อ และขยายสำหรับคัดแยกเซลล์ออกตามขนาดที่กำหนด โดยที่ท่อทางเข้ามีลักษณะเป็นท่อหน้าตัดตรงกว้าง 50 ไมโครเมตร และยาว 5 มิลลิเมตรในส่วนท้ายของท่อเป็นทางออกหลักกว้างเท่ากับท่อทางเข้าแต่มี ความยาว 3 มิลลิเมตร ด้านในส่วนขยายจะมีท่อการไหลต่อออกไปทางด้านข้างซึ่งจะนำของไหลไปสู่ส่วน ขยายที่สองที่มีส่วนประกอบเหมือนกับส่วนแรก

การทดลองได้มีการใช้เม็ดพลาสติกขนาด 5 10 15 และ 20 ไมโครเมตรการทดลองแสดงว่าค่าเรย์โนลด์สนัมเบอร์ของการไหลในส่วนที่หนึ่งนั้นสามารถแยกอนุภาค 5 10 15 และ 20 ไมโครเมตรได้เท่ากับ 53 72 93 และ 73 เพอร์เซ็นต์ตามลำดับ

งานวิจัยที่ผ่านมาสามารถนำมาปรับใช้กับโครงการได้โดยใช้เป็นตัวกำหนดของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อและความยาวว่าควรจะมีขนาดของความแตกต่างของข้อมูลเท่าใดจึงจะมีความน่าเชื่อถือของข้อมูลและใช้เป็นแนวทางในการเลือกวิธีตรวจวัดเซลล์เม็ดเลือดขาวในนมวัวด้วยว่าควรที่จะใช้วิธีการตรวจวัดใด

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการทำวิจัย

3.1 ศึกษาวิธีการตรวจวัดคุณภาพนมวัวที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

3.1.1 ศึกษาวิธีการตรวจวัดคุณภาพนมวัวที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยวิธีวัดคุณภาพน้ำนมที่ใช้ในปัจจุบันจะเป็นการวัดปริมาณโซมาติกเซลล์ที่ปะปนอยู่ในน้ำนม เซลล์โซมาติก เป็นเนื้อเยื่อประกอบด้วย เม็ดเลือดขาว และเยื่อผนังของท่อส่งนมหรือถุงพักน้ำนมซึ่งหลุดลอกปนในน้ำนม ขณะที่รีดนมออกมาปริมาณของเซลล์โซมาติกจะเป็นตัวบ่งบอกคุณภาพของน้ำนมวัวถ้าสภาพของเต้านมอักเสบและถุงพักน้ำนมเป็นปกติปริมาณเซลล์จะต่ำเมื่อมีการติดเชื้อเกิดขึ้นร่างกายจะสร้างเม็ดเลือดขาว (Polymorphonuclear) เพื่อทำลายเชื้อโรคขณะเดียวกันเนื้อเยื่อเต้านม ท่อน้ำนมที่ถูกเชื้อโรคทำลายจะอ่อนแอและมีการหลุดลอกมากขึ้นนอกจากนี้การหลุดลอกของ เนื้อเยื่อที่มากขึ้นยังสามารถเกิดได้จากการรีดนมที่ผิดวิธี การใช้เครื่องรีดนมวัวที่มีความดันสูงเกินไป หรือมี จังหวะรีดนมที่ไม่เหมาะสม

3.1.2 ประโยชน์ที่ได้จากการตรวจนับเซลล์ ทำให้ทราบความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับเต้านม ซึ่งทำให้สามารถดูแลจัดการฝูงโคนมได้ ทันทีหากก่อนแสดงอาการ ในปัจจุบันเกษตรกรที่เลี้ยงโคนมเป็นจำนวนมากจะมีปัญหาในการดูแลและ จัดการฝูงโคนม จึงต้องใช้วิทยาการนี้ช่วยหากโคนมตัวใดให้นมที่มีเซลล์สูง ก็จะเก็บตัวอย่างน้ำนมส่งตรวจ ทางจุลชีววิทยาขณะเดียวกันก็จะแยกโคนมนั้นไว้รีดนมทีหลังเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรคที่ อาจทำให้เกิดเต้านมอักเสบไปสู่วิถีโคนมตัวอื่นๆ เซลล์โซมาติกสามารถเป็นตัวชี้วัดในการ ควบคุมเต้านมอักเสบชนิดไม่แสดงอาการ หากเป็นน้ำนมรวมของฝูงจะต้องมีค่าไม่เกิน 500,000 เซลล์ต่อ มิลลิลิตร และถ้าเป็นนมวัวรายตัวต้องมีค่าไม่เกิน 250,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในประเทศไทยให้คุณภาพน้ำนมเกรดหนึ่งมีจำนวน 100,000 เซลล์ต่อน้ำนม 1 มิลลิลิตร จุลินทรีย์ในน้ำนมสามารถตรวจนับได้หลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมงมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ได้กำหนดให้น้ำนมดิบที่นำมาผลิตเป็นน้ำนมสดมี

จุลินทรีย์ทั้งหมดในน้ำนมไม่เกิน 400,000 เซลล์ต่อน้ำนม 1 มิลลิลิตร การตรวจนับแบคทีเรียที่ชอบความเย็น ยังมีแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งในน้ำนมซึ่งเจริญได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แบคทีเรียกลุ่มนี้พบได้ในเต้านมและในถัณม ซึ่งมีอุณหภูมิที่ลดต่ำ 2-7 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่ของจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถถูกทำลายได้ด้วยความร้อน หากยังมีอยู่ในน้ำนมจะทำให้คุณภาพของน้ำมนั้นลดลง มักทำให้เกิดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ เพราะจุลินทรีย์พวกนี้จะสร้างน้ำย่อยออกมาย่อยโปรตีนและไขมันในน้ำนม ทำให้น้ำนมเสื่อมคุณภาพและเน่าเสียได้ การตรวจนับแบคทีเรียกลุ่มนี้ จะบ่มที่อุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน

3.1.3 โปรแกรมโซลิดเวิร์ค (Solid Work) เป็นซอฟต์แวร์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบสำหรับงานด้านวิศวกรรม เช่น ชิ้นส่วน อุปกรณ์ เครื่องจักร เป็นต้น Solid Work ซึ่งสามารถจำลองเป็นโมเดลสามมิติได้ และมีความละเอียดว่าโปรแกรมออกแบบสองมิติทั่วไปในการวิเคราะห์ค่าที่ต้องการทราบ เช่น ความแข็งแรง อุณหภูมิ อายุการใช้งาน เป็นต้น ประสิทธิภาพของ SolidWorks เป็นการเจาะลึกให้นักออกแบบสามารถสร้างชิ้นงานจำลองทางด้านการออกแบบได้อย่างสมบูรณ์แบบ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการคำนวณทางวิศวกรรม และการตรวจสอบความผิดพลาดของโมเดลของแข็งสามมิติ เพื่อลดต้นทุนในการผลิต และลดระยะเวลาการทำงานในการออกแบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในบริษัทและองค์กร โดยในหัวข้องานวิจัยที่ได้จัดทำขึ้นนี้จะใช้งานโปรแกรม Solid Work ในการออกแบบช่องทางการไหลจุลภาคสามมิติโดยมีการกำหนดให้รูปร่างของพื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลจุลภาคที่แตกต่างกัน แล้วจึงแปลงไฟล์ที่ได้ทำไว้ภาคในโปรแกรม Solid Work เข้าไปยังโปรแกรม Comsol Physics เพื่อทำการจำลองสภาพการณ์ต่อไป

3.1.4 โปรแกรมคอมโซลฟิสิกส์ (Comsol Physics) เป็นซอฟต์แวร์บนพื้นฐานการคำนวณด้วยระเบียบวิธี Finite Element ที่เป็นที่นิยมใช้กันมากในหมู่นักวิทยาศาสตร์และวิศวกร ใช้ในการจำลอง (simulation) และออกแบบ (design) ปัญหาต่างๆเชิงฟิสิกส์อย่างเสมือนจริง เป็นการประมวลผลเชิงโต้ตอบ มีความยืดหยุ่นสูงในการเพิ่มหรือลดการปฏิสัมพันธ์ของเงื่อนไขต่างๆ สามารถมองเห็นความเป็นไปของกลไกต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่นการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็ก, ความร้อนหรือของไหล ในระบบที่ทดลองออกแบบขึ้นมา ซึ่งปกติจะมองไม่เห็นด้วยตา เป็นการทดลองแก้ปัญหาหรือออกแบบในคอมพิวเตอร์ที่สะดวก อีกทั้งยังประหยัดเวลาและงบประมาณ COMSOL Multiphysics แตกต่างจากซอฟต์แวร์อื่นๆด้านความสามารถในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่คู่ควบกัน ซึ่งผลการจำลองที่ได้จะแตกต่างกับผลการจำลองเมื่อแต่ละปรากฏการณ์เป็นอิสระต่อกัน ในการจำลองปรากฏการณ์โดยใช้ COMSOL Multiphysics ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องมีความรู้เชิงลึกในคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เนื่องจากใน COMSOL Multiphysics มีระบบปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ต่างๆ รวมทั้งปริมาณทางฟิสิกส์และชนิดของวัสดุให้เลือกจากคลังข้อมูลภายในซอฟต์แวร์เอง

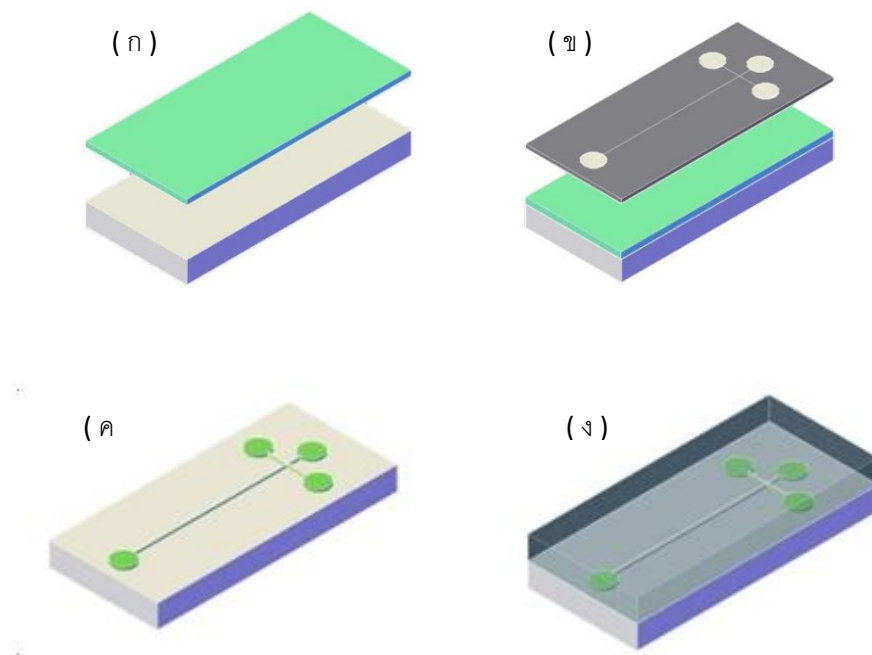
3.1.5 ติดต่อหน่วยวิจัยช่องทางการไหลจุลภาค Microfluidic Channel Research Unit ที่ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เนื่องจากภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์มีหน่วยงานวิจัยด้านช่องทางการไหลจุลภาคภายในสำนักงานกลางศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ หรือ TheP ซึ่งมีนักวิจัยและนักศึกษาภายในหน่วยงานวิจัยที่มีความชำนาญเฉพาะด้าน อีกทั้งยังมีอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการออกแบบและสร้างช่องทางการไหลจุลภาคที่ทำจากซิลิคอน อีกทั้งสำนักงานกลางศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ยังให้บริการด้วย COMSOL Server และ โมดูลจำเพาะด้าน Wave Optics Module Heat Transfer Module Plasma Module AC/DC Module และ Semiconductor Module ที่ถูกลิขสิทธิ์และยังมีฐานข้อมูลด้านงานวิจัยที่เคยทำไว้ก่อนแล้ว ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยที่ได้ทำอยู่ในตอนนี้ได้

โดยให้มีลักษณะของพื้นที่หน้าตัดของท่อที่แตกต่างกันและติดต่อกันในเชิงทฤษฎีศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เพื่อศึกษาหลักการทำงานของเครื่องมือและวิธีการของเครื่องมือไฮดรอลิก เม็ดเลือดขาวเพื่อทำการนับจำนวนเซลล์ และวิธีการที่ใช้ในการตรวจวันคุณภาพน้ำนมวัวที่ใช้งานกัน อยู่ในปัจจุบันรวมถึงเกณฑ์ในการประเมิน

โดยใช้โครงสร้างช่องทางการไหลจุลภาคที่ได้ทำการออกแบบแบบสามมิติไว้ในโปรแกรม Solid Work และการออกแบบสองมิติที่สามารถออกแบบได้ภายในโปรแกรม Comsol Physics โดยจะให้เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของท่อที่แตกต่างกัน

การสร้างท่อการไหลโดยฟิล์มไวแสงชนิดลบ สามารถกำหนดความกว้างของท่อได้ซึ่งจะมี ความ กว้างเท่ากับความกว้างของเส้นที่ออกแบบบนแผ่นใส แต่ไม่สามารถกำหนดความสูงของท่อการ ไหลได้เนื่องจากความสูงจะถูกกำหนดโดยความหนาของฟิล์มในการสร้างท่อการไหลเริ่มจากทำความ สะอาดกระจกสไลด์เพื่อกำจัดฝุ่นและไขมัน เคลือบฟิล์มไวแสงบนกระจกสไลด์โดยใช้ความร้อน และ ไม่ให้เกิดฟองอากาศอยู่ระหว่างฟิล์มและกระจก ดังภาพ 3.1 (ก) นำแผ่นใสที่มีลวดลายของท่อ การ ไหลมาติดหน้าฟิล์มไวแสงแล้วนำไปฉายแสง

ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร เป็นเวลา 50 วินาที ดังภาพ 3.1 (ข) ลอกแผ่นพลาสติกที่ติดอยู่บนผิวฟิล์มไวแสงออกจากนั้นนำฟิล์มดังกล่าวไปล้างในสารละลาย Na_2CO_3 เป็นเวลา 50 วินาทีบริเวณที่ไม่โดนแสงจะถูกล้างออก จากนั้นนำไปล้างน้ำเพื่อล้างเศษฟิล์ม ขนาดเล็กออก ดังภาพ 3.1 (ค) ซึ่งจะถูกใช้เป็นแม่พิมพ์สำหรับการไหล หลังจากขั้นตอนนี้สามารถทำการเปิดไฟในห้องทดลองได้ตามปกติ จากนั้นนำแม่พิมพ์ไปวางบนแผ่นให้ความร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ฟิล์มติดกับกระจกดีซีขึ้น

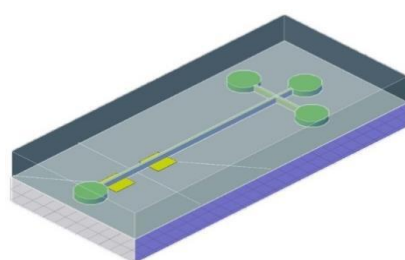


ภาพ 3.1 ขั้นตอนการทำท่อการไหล (ก) การติดฟิล์มไวแสงบนกระจกสไลด์, (ข) การวางแผนใส่ลงบนแผ่นฟิล์มก่อนทำการฉายแสง (ค) แม่พิมพ์ของท่อการไหล (ง) PDMS บนแม่พิมพ์ท่อ

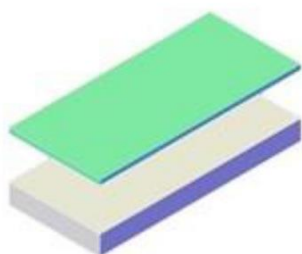
ทาบล้อกสีเหลืองล้อมรอบแม่พิมพ์ดังกล่าวเท PDMS ลงไปและนำไปวางบนแผ่นให้ความร้อนอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จน PDMS แข็งตัว ท่อการไหล PDMS จะติดอยู่กับแม่พิมพ์ดังรูปที่ 3.1 (ง) จากนั้นดึง PDMS ออกจากแม่พิมพ์จะได้ท่อการไหลสำหรับเทคนิค C4D จากนั้นทำการเจาะรู PDMS ตามวงกลมที่ออกแบบไว้

3.5 การสร้างระบบตรวจวัด C4D

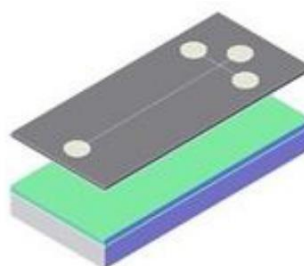
นำขั้วไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดและท่อการไหลไปอาบออกซิเจนพลาสมาที่ความดัน 7×10^{-2} ทอร์ ความถี่ 13.5600 เมกกะเฮิร์ต ระยะเวลา 30 วินาทีที่ประกบท่อ PDMS บนกระจกสไลด์โดยให้บริเวณท่อพาด ผ่านตรงกลางขั้วไฟฟ้า PDMS จะติดกับกระจกสไลด์อย่างถาวร ได้ระบบตรวจวัด C4D ดังภาพ 3.2 จากนั้นเติมน้ำ deionized water (DI) ให้เต็มท่อเพื่อรักษาสภาพความชอบน้ำของผนังท่อการไหล ติดเทปอะลูมิเนียมกับขั้วไฟฟ้าและเส้นกราวด์ตรงบริเวณขอบด้านข้างจะได้ระบบตรวจวัด C4D ที่พร้อมใช้งานแผนภาพสรุปการสร้างระบบตรวจวัดแสดงในภาพ 3.3



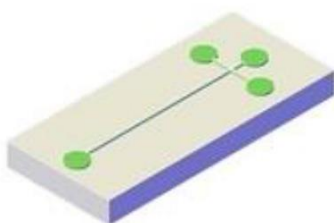
ภาพ 3.2 ระบบตรวจวัด C4D



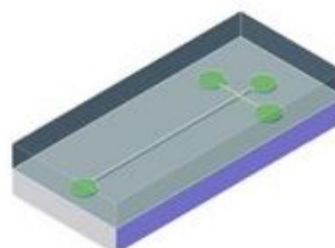
(ก) ติดแผ่นฟิล์มบนกระจก



(ข) ฉาบแสงสีม่วง

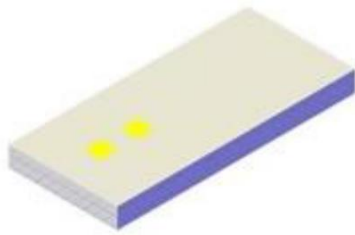


(ค) ล้างด้วย Na_2CO_3

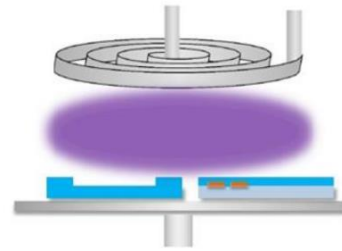


(ง) เท PDMS ลงไปให้ความร้อนจน

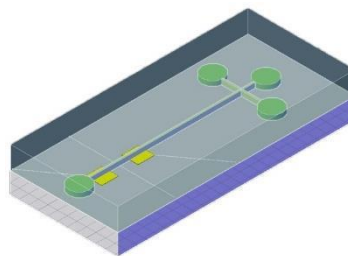
แข็งตัว



(จ) เคลือบผิวไฟฟ้าด้วย PDMS
ตรวจวัด



(ฉ) อาบออกซิเจนพลาสมาแก่ท่อไมครอนและช่อง

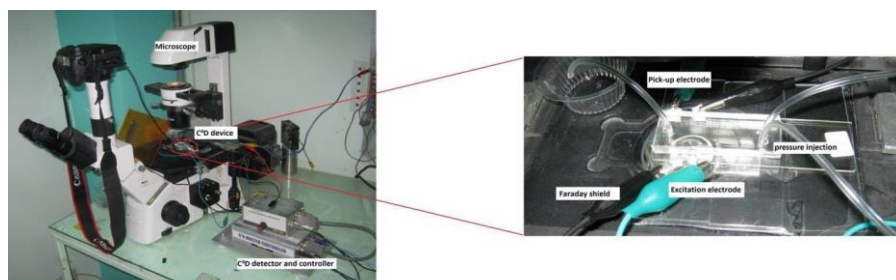


(ช) นำมาประกบกันจะได้ระบบตรวจวัด C4D

ภาพ 3.3 แผนภาพสรุปการสร้างระบบตรวจวัด (ก) (ข) (ค) (ง) (จ) (ฉ) และ (ช)

3.6 การทดลองวัดสัญญาณ C4D

ในการออกแบบท่อการไหลของเทคนิค C4D ได้ออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้กับการใช้แรงดันในการทำให้สารเคลื่อนที่ข้างในการทดลองมีดังภาพ 3.4



ภาพ 3.4 ระบบอุปกรณ์ของเทคนิค C4D ในห้องปฏิบัติการ

จัดระบบอุปกรณ์ดังภาพ 3.4 โดยวางตำแหน่งไมโครชิฟอยู่บนกล่องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน Motic รุ่น AE31 ทำให้สามารถสังเกตเห็นและสามารถบันทึกผลเมื่อมีอนุภาคเคลื่อนที่มาถึงขั้วไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ C4D detector and controller จะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เตรียมอนุภาคที่ต้องการ วัด ได้แก่ อนุภาคแกรไฟต์และหยดน้ำมันละหุ่งผสมใน Tween®-20 ก่อนที่จะใส่สารตัวอย่างที่เป็น น้ำมันวัวดิบจริงๆ เนื่องจากขนาดของแกรไฟต์นั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกับเซลล์เม็ดเลือดขาวที่อยู่ภายใน น้ำมันวัว โดยใส่อนุภาคในอัตราส่วนที่เหมาะสมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ถ้าอัตราส่วนอนุภาคมากเกินไปจะทำให้มีอนุภาคจำนวนมาก เคลื่อนที่ในท่อการไหล ทำให้สัญญาณที่วัดได้ไม่มีความชัดเจน ใช้ความดันเพื่อขับเคลื่อนอนุภาคใน สารละลายในท่อเข้าสู่บริเวณขั้วไฟฟ้า บันทึกวิดีโอผ่านกล่อง จุลทรรศน์ด้วยกล้อง Canon รุ่น EOS60D ในขณะที่กำลังวัดข้อมูลด้วยโปรแกรม C4D Data Acquisition เพื่อเปรียบเทียบเวลาที่อนุภาคเคลื่อนผ่านขั้วไฟฟ้าและลักษณะของกราฟในขณะนั้น นำข้อมูลที่ได้อัปโหลดสัญญาณและสัญญาณที่วัดได้จะแสดงในรูปแบบกราฟกระแสไฟฟ้าต่อเวลา

3.7 ประเมินสาเหตุที่เกิดขึ้นและทำการเปรียบเทียบผล

ทำการประเมินหาสาเหตุและทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองสภาพการณ์กับผลที่เกิดขึ้นจริงของการตรวจนับที่ได้จากเครื่องตรวจนับเซลล์เม็ดเลือดขาวในปัจจุบันมาดูได้ในขั้นตอนที่ (4.1)

3.8 หาแนวทางการปรับปรุงเมื่อทราบสาเหตุของปัญหา

ทำการหาปัจจัยที่มีผลทำให้ค่าที่ได้จากการจำลองสภาพการณ์ไม่ตรงกับการตรวจวัดคุณภาพนมวัวที่วัดได้จริงสามารถดูได้จากขั้นตอนที่ (4.2)

3.9 ดำเนินการปรับปรุงตามแผน

ปรับปรุงโมเดลทั้งแบบสองมิติและสามมิติเพื่อให้ได้ผลที่มีค่าที่เท่ากับหรือใกล้เคียงกับการตรวจวัดคุณภาพนมวัวที่ตรวจวัดจริงสามารถดูได้จากขั้นตอนที่ (4.2)

3.10 สรุปผลและจัดทำรายงาน

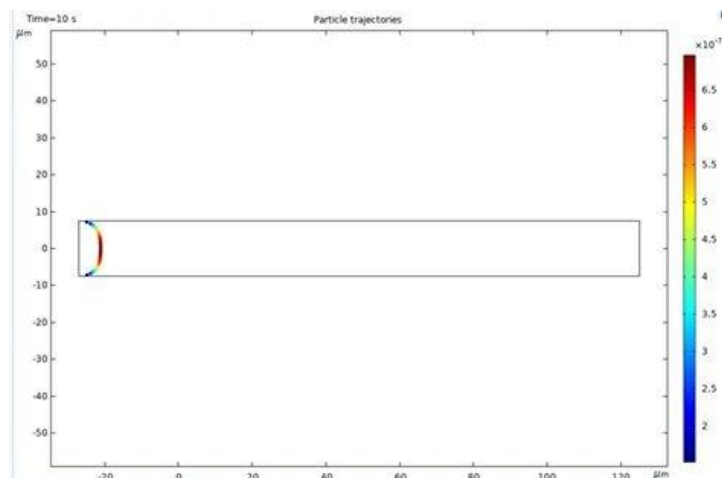
สรุปผลและจัดทำรายงานเพื่อรายงานผลการทดลองสามารถดูได้จากขั้นตอนที่ (5.1) และ (5.2)

บทที่ 4

ผลการดำเนินการ

4.1 ลักษณะการจำลองสภาพการณ์ภายในโปรแกรม

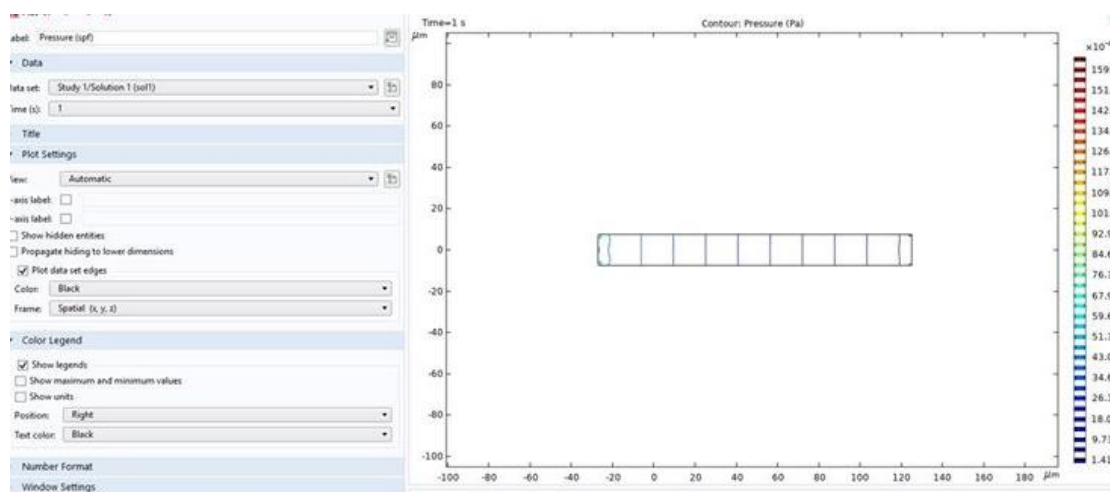
การจำลองสภาพการณ์ของช่องทางการไหลจุลภาคภายในโปรแกรมคอมโซลฟิสิกส์ (COMSOL Physics) จะเป็นการจำลองลักษณะสภาพแวดล้อมตามที่ผู้ทดลองต้องการ จากภาพ 4.1 จะเป็นการจำลองการไหลของน้ำนมดิบในท่อวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 ไมโครเมตรและมีการกำหนดอนุภาคให้มีค่าความหนาแน่นและขนาดให้ใกล้เคียงกับเซลล์เม็ดเลือดขาวของวัวนม



ภาพ 4.1 การจำลองการไหลของอนุภาค

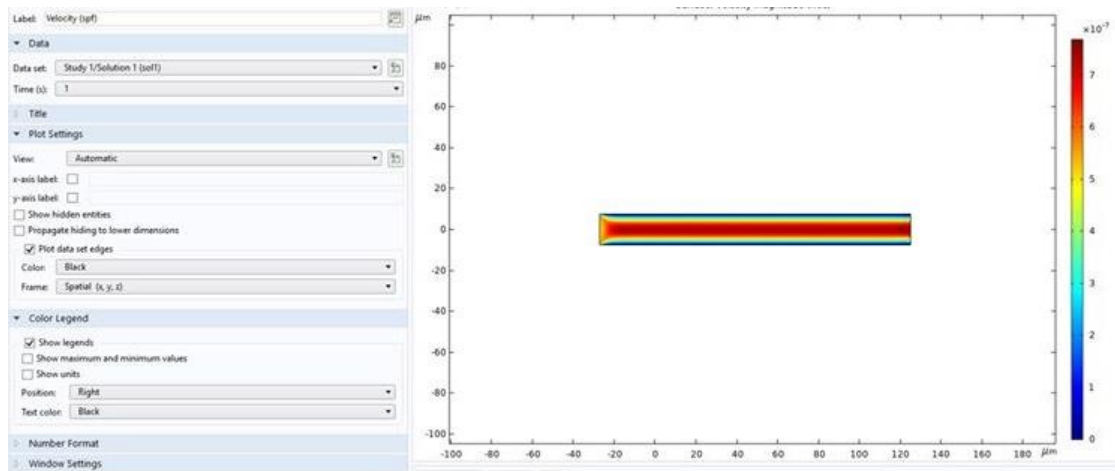
โดยจากภาพ 4.1 จะเป็นการจำลองลักษณะการไหลของอนุภาคโดยจะบ่งบอกออกมาเป็นแถบสีเพื่อแยกความหนาแน่นของอนุภาคที่ไหลภายในน้ำนมดิบโดยแถบสีที่มีค่าความยาวคลื่นน้อยหรือสีแดงจะมีการเกาะกลุ่มของอนุภาคเซลล์เม็ดเลือดขาวอยู่เป็นจำนวนมากและแถบสีที่มีค่าความยาวคลื่นมากหรือสีน้ำเงินจะบ่งบอกถึงพื้นที่ภายในท่อที่มีอนุภาคเกาะกลุ่มกันน้อย

การจำลองสภาพการณ์โดยเปรียบเทียบจากค่าความดันจากภาพ 4.2 จะเป็นการจำลองสภาพการณ์ของเซลล์เม็ดเลือดขาวที่ไหลอยู่ภายในช่องทางการไหลจุลภาคขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 ไมโครเมตร โดยจะมีขนาดของเซลล์เม็ดเลือดขาวทั้งหมดสองขนาดคือ 7 ไมโครเมตรและ 9 ไมโครเมตรเนื่องจากในความเป็นจริงแล้วเซลล์เม็ดเลือดขาวแต่ละเซลล์มีขนาดที่ไม่เท่ากันอยู่แล้วโดยจากภาพจะเห็นได้ว่าค่าความดันของเหลวที่ไหลอยู่ภายในช่องทางการไหลอนุภาคนั้นมีค่าแตกต่างกันโดยบริเวณที่มีสีโทนแดงจะบ่งบอกถึงว่าพื้นที่นั้นมีค่าความดันของของเหลวที่สูงและบริเวณที่มีสีโทนน้ำเงินหรือเฉดสีอื่นจะบ่งบอกว่าพื้นที่ดังกล่าวมีค่าความดันน้อยกว่า



ภาพ 4.2 แสดงการจำลองการไหลโดยใช้ความดันเป็นตัวแปร

ต่อไปจะเป็นการจำลองการไหลของอนุภาคเซลล์เม็ดเลือดขาวภายในท่อโดยให้ค่าความเร็วในการไหลของอนุภาคที่ไหลอยู่ภายในช่องทางการไหลอนุภาคเป็นตัวแปรโดยจะกำหนดให้บริเวณปลายท่อด้านซ้ายเป็นจุดที่มีค่าความดันค่าหนึ่งและปลายท่อทางขวาเป็นจุดที่ท่อมีความดันเป็นศูนย์เพื่อที่จะสังเกตการไหลของอนุภาคที่ไหลอยู่ภายในช่องทางการไหลดังกล่าว จากภาพ 4.3 จะเห็นได้ว่าบริเวณกึ่งกลางของท่อจะเป็นบริเวณที่มีสีแดงบ่งบอกว่าอนุภาคที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของท่อนั้นไหลเร็วกว่าอนุภาคที่อยู่บริเวณขอบภายในของท่อที่มีสีน้ำเงินเนื่องจากเมื่อของเหลวสัมผัสกับของของภาชนะจะเกิดแรงหน่วงทำให้อนุภาคที่ไหลอยู่ภายในท่อมีความเร็วที่ลดลง

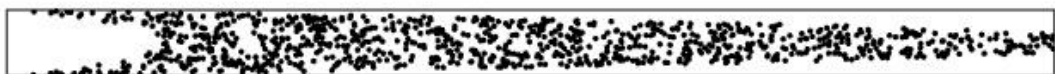


ภาพ 4.3 แสดงความเร็วในการไหลของอนุภาคภายในช่องทางการไหล

ทำการจำลองการไหลของเซลล์เม็ดเลือดขาวในนมวัวโดยการกำหนดให้ขนาดของท่อการไหล จุลภาคมีขนาดที่แตกต่างกันตั้งแต่ 100 ไมโครเมตร 70 ไมโครเมตร 50 ไมโครเมตรและ 20 ไมโครเมตรดังภาพ 4.4



(ก).ท่อการไหลขนาด 20 ไมโครเมตร



(ข).ท่อการไหลขนาด 50 ไมโครเมตร



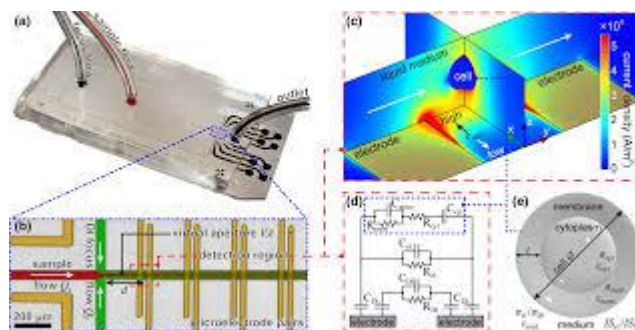
(ค).ท่อการไหลขนาด 70 ไมโครเมตร



(ง).ท่อการไหลขนาด 100 ไมโครเมตร

ภาพ 4.4 แสดงท่อการไหลที่มีขนาดแตกต่างกัน (ก) (ข) (ค) และ (ง)

จากผลการทำการจำลองสภาพการณ์โดยการกำหนดให้ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อการไหลจุลภาคมีความแตกต่างกันทำให้ทราบว่ายังกำหนดให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อมีขนาดเล็กเกินไป ยิ่งทำให้อนุภาคเกิดการเรียงตัวอย่างเห็นได้ชัดซึ่งจะส่งผลต่อการตรวจวัดโดยใช้ชีวไฟฟ้าวัดค่าความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างสสารที่ไหลผ่านท่อเนื่องจากหากมีเซลล์เม็ดเลือดขาวเคลื่อนที่มาพร้อมกันที่ตำแหน่งตรวจวัดจะทำให้ค่าที่วัดได้ไม่ตรงกับความเป็นจริง โดยลักษณะของการตรวจวัดอนุภาคที่สนใจศึกษาแสดงดังภาพ 4.5



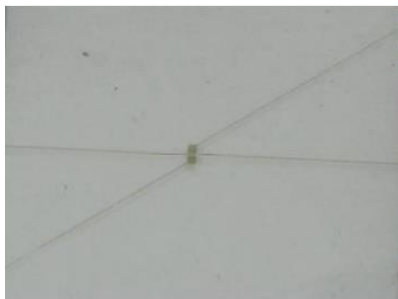
ภาพ 4.5 แสดงลักษณะการตรวจวัดโดยใช้ชีวไฟฟ้า

ที่มา : <http://biomedfrontiers.org>

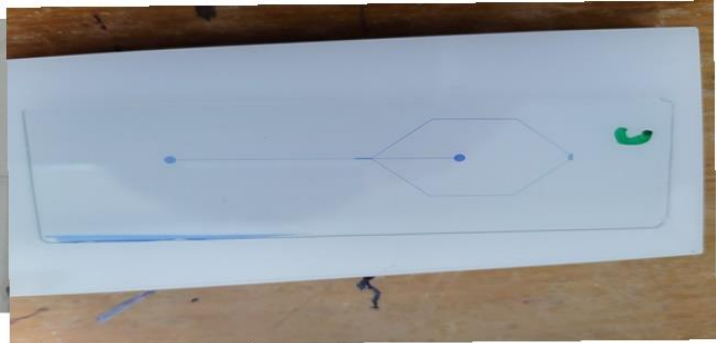
4.2 การสร้างชีวไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดและท่อการไหล

จากการทดลองชีวไฟฟ้าที่เล็กที่สุดที่สร้างได้มีขนาด 50 μm โดยมีบริเวณปลายชีวเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมขนาด 500x 500 ไมโครเมตร ดังภาพ 4.6 (ก) สามารถสร้างแม่พิมพ์สำหรับท่อการไหล ดัง

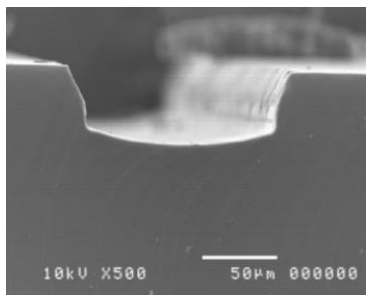
ภาพ 4.6 (ข) มีความกว้าง 150 ไมโครเมตร และสูง 50 ไมโครเมตร ภาพ 4.6 (ค) แสดงภาพตัดขวางของท่อการไหลที่สร้างจาก PDMS ถ่ายด้วยเทคนิค SEM ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (LV-SCM) JEOL JSM-5910LV ภาพ 4.6 (ง) แสดงรูประบบตรวจวัดที่สร้างจากท่อการไหลและขั้วไฟฟ้า



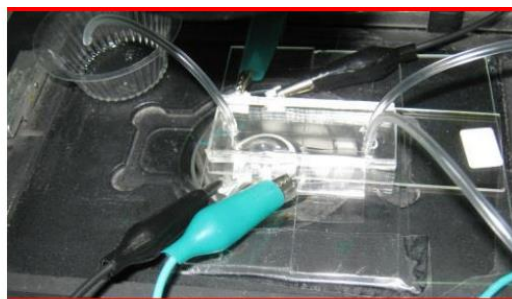
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพ 4.6 ลักษณะขั้วไฟฟ้า C4D และท่อการไหลที่สร้างได้ (ก) ขั้วไฟฟ้าสำหรับตรวจวัด

(ข)แม่พิมพ์ท่อการไหลกว้าง 150 ไมโครเมตร และสูง 50 ไมโครเมตร (ค)

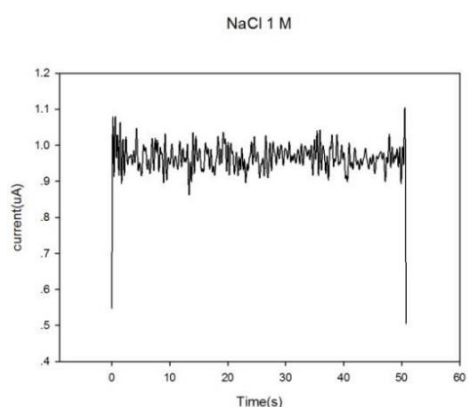
ภาพตัดขวางของ งท่อการไหล (ง) ระบบตรวจวัด C4D

4.3 ผลการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีระยะห่างระหว่างขั้ว 100 μm และมีกราวด์ระหว่างขั้วไฟฟ้า

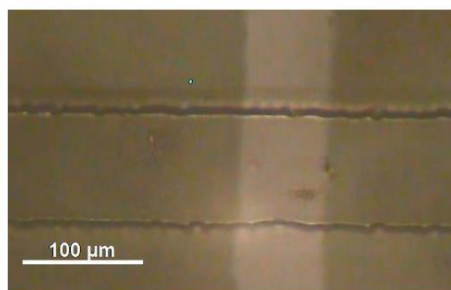
4.3.1 อนุภาคแกรไฟต์

ภาพ 4.7 (ก) คือสัญญาณที่ตรวจวัดได้จาก BGE ซึ่งได้ใช้สารละลาย NaCl 1 โมล รูปที่ 4.7 (ข) แสดงอนุภาคแกรไฟต์ที่เคลื่อนที่ผ่านขั้วไฟฟ้ามีขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตร ดังภาพ 4.7 (ค) แสดงสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านขั้วไฟฟ้า และเป็นข้อมูลดิบที่ยังไม่ผ่านการกรองสัญญาณ ดังภาพ 4.7 (ง) แสดงสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยโปรแกรม Sigmaplot

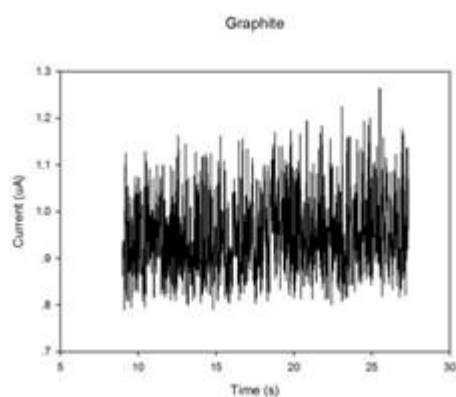
จากภาพ 4.7 (ก) แสดงถึงภาพของกราฟที่ได้จากการตรวจวัดจากขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายในท่อ การไหลโดยตรงกราฟที่ได้จึงมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่มากเนื่องจากสิ่งที่ไหลอยู่ในท่อนั้นไม่ได้มีแค่เซลล์เม็ด เลือดขาวอาจจะมีเศษฝุ่นที่ปะปนอยู่ในอากาศไหลไปกับสารละลายด้วยอีกทั้งค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ ตรวจวัดยังเป็นกระแสไฟฟ้าจากไฟบ้านจึงมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ด้วยโดยภาพ 4.7 (ข) เป็นภาพ ของกราฟที่ผ่านเครื่องกรองสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อขยายสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วจากนั้นภาพ 4.7(ค) เป็นภาพของกราฟที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนต่างๆออกเหลือเพียงแต่สัญญาณความต่างศักย์ของ ของเหลวที่ไหลอยู่ภายในท่อและอนุภาคแกรไฟต์เท่านั้นโดยจุดที่สูงสุดของภาพ 4.7(ค)เป็นจุดที่ อนุภาคแกรไฟต์ไหลผ่านขั้วตรวจวัดพอดี



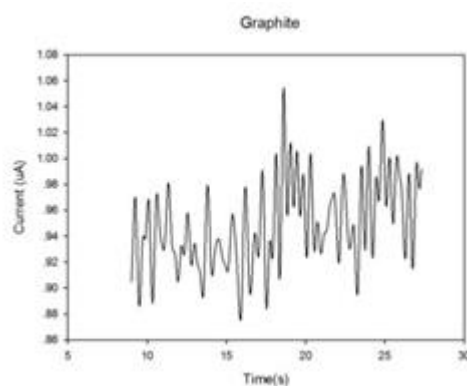
(ก)



(ข)



(ค)

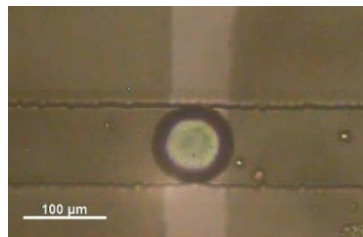


(ง)

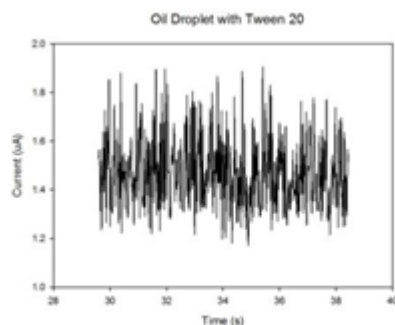
ภาพ 4.7 อนุภาคแกรไฟต์ที่ตรวจวัดได้และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าต่อเวลา (ก) สัญญาณที่ตรวจวัดได้จากBGE (ข) อนุภาคแกรไฟต์ที่ตรวจวัด (ค) แสดงสัญญาณที่ตรวจวัดได้ (ง) สัญญาณที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวน

4.3.2 น้ำมันละหุ่งผสมใน Tween- 20

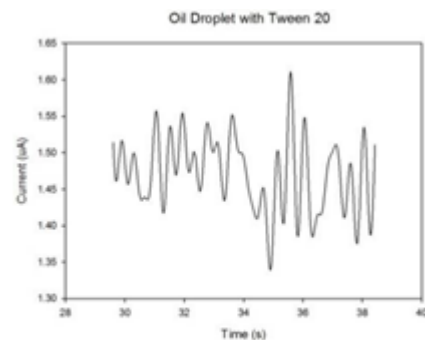
ภาพ 4.8 (ก) แสดงหยดน้ำมันละหุ่งที่เคลื่อนที่ผ่านขั้วไฟฟ้ามีขนาดประมาณ 100 ไมโครเมตร ภาพ 4.8 (ข) แสดงสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในเวลาเดียวกันขณะที่หยดน้ำมันเคลื่อนที่ผ่านขั้วไฟฟ้าและเป็นข้อมูลดิบ ที่ยังไม่ผ่านการกรองสัญญาณ ภาพ 4.8 (ค) แสดงสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยโปรแกรม Sigmaplot



(ก)



(ข)



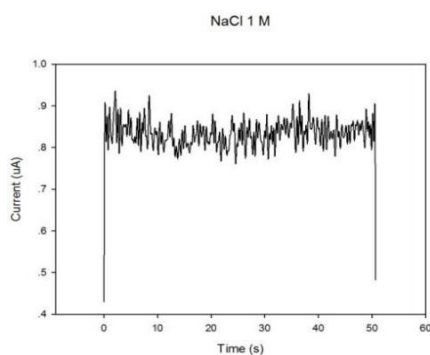
(ค)

ภาพ 4.8 หยดน้ำมันละหุ่งผสมใน Tween- 20 ที่ตรวจวัดได้และกราฟแสดงความ
ระหว่าง กระแสไฟฟ้าต่อเวลา (ก) หยดน้ำมันละหุ่งที่วัดได้ (ข) สัญญาณที่
ตรวจวัด (ค) สัญญาณที่ ผ่านการกรองสัญญาณรบกวน

4.4 แบบไม่มีกรวดอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า

4.4.1 อนุภาคแกรไฟต์

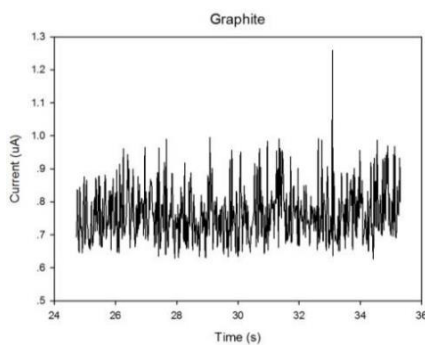
ภาพ 4.9 (ก) คือสัญญาณที่ตรวจวัดได้จาก BGE ซึ่งได้ใช้สารละลาย NaCl 1 โมล ภาพ 4.9 (ข) แสดงอนุภาคแกรไฟต์ที่เคลื่อนที่ผ่านขั้วไฟฟ้ามีขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตร ภาพ 4.9 (ค) แสดงสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในเวลาเดียวกันขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านขั้วไฟฟ้าและเป็นข้อมูลดิบที่ยังไม่ผ่านการกรองสัญญาณ ภาพ 4.9 (ง) แสดงสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยโปรแกรม Sigmaplot



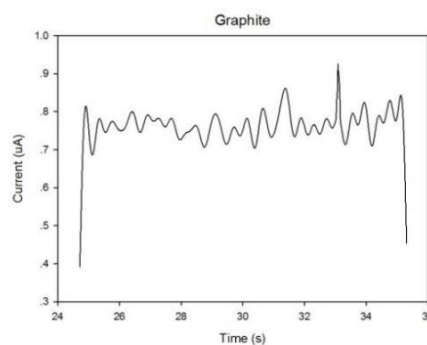
(ก)



(ข)



(ค)



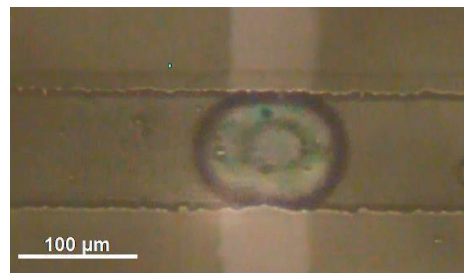
(ง)

ภาพ 4.9 อนุภาคแกรไฟต์ที่ตรวจวัดได้และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าต่อเวลา

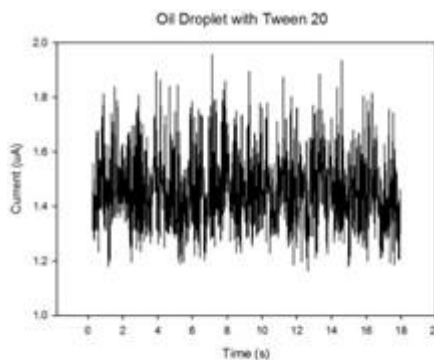
(ก) สัญญาณที่ตรวจวัดได้จาก BGE (ข) อนุภาคแกรไฟต์ที่ตรวจวัด (ค) แสดงสัญญาณที่ตรวจวัดได้ (ง) สัญญาณที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวน

4.4.2 น้ำมันละหุ่งผสมใน Tween-20

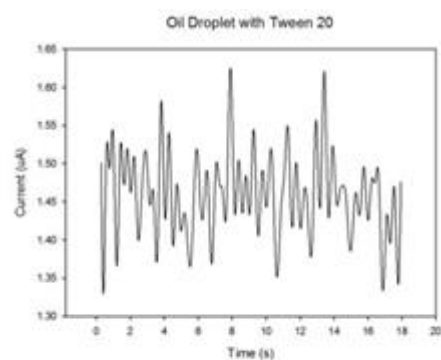
ภาพ 4.10 (ก) แสดงหยดน้ำมันละหุ่งที่เคลื่อนที่ผ่านหัวไฟฟ้ามีขนาดประมาณ 100 ไมโครเมตร ภาพ 4.10 (ข) แสดงสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในเวลาเดียวกันขณะที่หยดน้ำมันเคลื่อนที่ผ่านหัวไฟฟ้าและเป็นข้อมูลดิบที่ยังไม่ผ่านการกรองสัญญาณ ภาพ 4.10 (ค) แสดงสัญญาณที่ผ่านการกรองด้วยโปรแกรม Sigmaplot



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพ 4.10 หยดน้ำมันละหุ่งผสมใน Tween- 20 ที่ตรวจวัดได้และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าต่อเวลา (ก) หยดน้ำมันละหุ่งที่วัดได้ (ข) สัญญาณที่ตรวจวัด (ค) สัญญาณที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวน

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินการ

4.1 อภิปรายผลการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบกราฟสัญญาณกระแสไฟฟ้าพื้นฐานของ BGE จากข้อไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด พบว่า ข้อไฟฟ้าที่ต่อสายกราวด์ระยะห่าง 10 μm จะแสดงจุดสูงสุดของกราฟที่ชัดเจนกว่าจากภาพ 4.9(ง) จะเห็นได้ว่าจุดสูงสุดของกราฟสังเกตได้ง่ายกว่ากราฟที่ผ่านการกรองสัญญาณจากข้อตรวจวัดแบบอื่น จึงอนุมานได้ว่าข้อตรวจวัดที่มีระยะห่างระหว่างข้อ 10 μm เหมาะกับการตรวจวัดเซลล์เม็ดเลือดขาว ที่สุด

พิจารณากราฟสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากอนุภาคแกรไฟต์เมื่ออนุภาคเดินทางผ่านข้อไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยข้อไฟฟ้าระยะห่าง 100 μm ต่อสายกราวด์จะมีการเพิ่มขึ้นของสัญญาณกระแสไฟฟ้ามากอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับสัญญาณของพื้นฐานจาก BGE อนุภาคแกรไฟต์ ที่มีขนาดเล็กที่สุดที่สามารถตรวจวัดได้นั้นมีขนาดประมาณ 10 μm ในกรณีที่ข้อไฟฟ้าไม่มี เส้นกราวด์ ที่ระยะห่าง 50 และ 100 μm พบว่าสัญญาณกระแสที่วัดได้เมื่ออนุภาคไหลผ่านข้อไฟฟ้า จะมีการ เพิ่มขึ้นจากระดับของกระแสไฟฟ้าพื้นฐานเช่นกันแต่ไม่มากนัก เนื่องจากอนุภาคแกรไฟต์ที่ใช้วัดมี ขนาดไม่แน่นอน ทำให้ไม่สามารถระบุได้ว่าข้อไฟฟ้าที่มีระยะห่าง 50 หรือ 100 μm มีความไวในการ ตรวจวัดมากกว่า อนุภาคแกรไฟต์เล็กที่สุดที่สามารถตรวจวัดได้จากข้อทั้งสองดังกล่าวนี้มี ขนาด ประมาณ 10 μm เช่นกัน

เมื่อพิจารณากราฟสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากหยดน้ำมันละหุ่งผสมใน Tween-20 พบว่า สัญญาณที่ตรวจวัดได้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยสัญญาณกระแสไฟฟ้าของข้อไฟฟ้าที่มี ระยะห่าง 100 μm ต่อสายกราวด์มีค่าสูงขึ้นมากที่สุดจากภาพ 4.9(ง) เมื่อเทียบกับข้อไฟฟ้าอีกสอง ชนิดจากภาพ 4.7(ง) 4.8(ง)และ 4.10(ง) สัญญาณที่ยังไม่ผ่านการกรองมีความแตกต่างจากสัญญาณ รบกวนน้อยมาก แต่เมื่อกรองสัญญาณทำให้สามารถเห็นความแตกต่างของสัญญาณได้ชัดเจนขึ้น

การกรองสัญญาณด้วยโปรแกรม SigmaPlot เป็นการเขียนโค้ดกรองสัญญาณรบกวนแบบ Low pass filter ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่ผ่านการกรองมีขนาดของสัญญาณรบกวนน้อยลง และทำให้สัญญาณมีความเรียบขึ้น ซึ่งจะเป็นผลดีเมื่อสัญญาณที่วัดได้มีความแตกต่างอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะทำให้เห็นระดับความแตกต่างของสัญญาณชัดเจนขึ้น แต่ในการทดลองการวัดอนุภาคลักษณะสัญญาณที่ตรวจวัดได้นั้นเป็นสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่อง กราฟกระแสจะมีจุดยอดเพียงจุดเดียว ดังนั้นการกรองสัญญาณจะส่งผลให้ไปตัดค่ากระแสที่วัดได้ ให้มีขนาดเล็กลง ดังนั้นการกรองกระแสจึงไม่มีความจำเป็นในกรณีที่การตรวจวัดอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้ามากๆ แต่ในกรณีที่ สัญญาณที่บันทึกมีความแตกต่างจากสัญญาณพื้นฐานไม่มากการกรองสัญญาณจะช่วยให้เห็นระดับความแตกต่างของสัญญาณมากขึ้น

5.2 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดของเทคนิค C4D ผลที่ได้คือสามารถขั้วไฟฟ้าทองคำลงบนแผ่นกระจกสไลด์โดยใช้เทคนิคการสร้างแผ่นพิมพ์ลายวงจร (Printed Circuit Board, PCB) ซึ่งขั้วไฟฟ้ามีขนาดเส้นที่เล็ก 50 ไมโครเมตร ด้านปลายมีลักษณะสี่เหลี่ยม $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ มีระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสอง 50 ไมโครเมตร ในกรณีที่ไม่มีเส้นกราวด์และระยะห่าง 100 μm ในกรณีที่มีและไม่มีเส้นกราวด์ สามารถสร้างท่อการไหลระดับไมโครเมตรจาก PDMS ที่มีความสูงประมาณ 50 μm กว้างประมาณ 100 ไมโครเมตร เมื่อนำท่อการไหลและขั้วไฟฟ้าไปอาบออกซิเจนพลาสมาและนำมาประกบกันได้เป็นระบบตรวจวัด C4D ที่ขั้วไฟฟ้าติดอยู่ภายในเซลล์ตรวจวัดอย่างถาวร ผลการตรวจวัดอนุภาคแกรไฟต์และ น้ำมันละหุ่งผสมใน Tween- 20 คือสามารถตรวจวัดอนุภาคแกรไฟต์และน้ำมันละหุ่งผสมใน Tween- 20 ได้ โดยอนุภาคขนาดแกรไฟต์ที่เล็กที่สุดคือ 10 ไมโครเมตร และหยदन้ำมันละหุ่งผสมใน Tween- 20 คือ 100 ไมโครเมตร ขั้วไฟฟ้าระยะห่าง 100 ไมโครเมตร มีกราวด์เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีความไวในการตรวจวัด อนุภาคมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าสองชนิดในกรณีไม่มีกราวด์

การตรวจวัดอนุภาคด้วยเทคนิค C4D ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากอนุภาคมาสัมพันธ์กับสภาพนำไฟฟ้าในอนาคตการตรวจวัดด้วยเทคนิค C4D เมื่อนำสัญญาณไฟฟ้าตรวจวัดได้มาที่วิเคราะห์อาจจะสามารถบ่งบอกถึงสมบัติภายในของอนุภาคได้เช่นสามารถวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบ ต่างๆ ภายในของเซลล์ได้เป็นต้น ซึ่งจะเป็นแนวทางในการต่อยอดการทำวิจัยต่อไป

บรรณานุกรม

คุณภาพน้ำนม เรื่องน่ารู้ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [ระบบออนไลน์].แหล่งที่มา

[http:// planning.dld.go.th](http://planning.dld.go.th) > images > stories > section-39 > zoning_36

จิรายุส บุณยะพงศ์การพัฒนาระบบของไหลจุลภาคเพื่อการแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อ มาลาเรีย

โดยอาศัยหลักการไดอิเล็กโตรโฟเรติกและแมกนีโตโฟเรติก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(2558)

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์ การตรวจสอบคุณภาพน้ำนมดิบ [ระบบ ออนไลน์]

แหล่งที่มา <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3179> (16 กันยายน

2562)

อำพล กำเนิดสุขการคัดแยกอนุภาคตามขนาดด้วยอุปกรณ์การไหลที่มีท่อหน้าตัดแบบย่อและ ขยาย

สองส่วน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2560)

Bruce A. Finlayson and R. Anthony Shaw Modeling Microfluidic Separations using

Comsol Multiphysics, University of Washington, National Research Council of

Canada [online] แหล่งที่มา [https://www.comsol.kr/paper/modeling-microfluidic-](https://www.comsol.kr/paper/modeling-microfluidic-separations-using-comsol-multiphysics-8117)

separations-using- comsol-multiphysics-8117 (16 September 2019)

Ravishankar Dudhe (2558) Micro Fluidics based Blood Protein Separation and

Behavior Modelling Implemented using COMSOL Multi Physics. Manipal

University- Dubai.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อสกุล : นาย วัชร ใจกล้า

รหัสนักศึกษา : 590612088

วัน เดือน ปีเกิด : 13 พฤษภาคม 2538

ประวัติการศึกษา : กำลังศึกษาระดับอุดมศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสามัคคีวิทยาคม จังหวัดเชียงราย

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสามัคคีวิทยาคม จังหวัดเชียงราย

ที่อยู่ปัจจุบัน : 16 หมู่ 11 ต.ป่าอ้อดอนชัย อ.เมือง จ.เชียงราย

อีเมล : watcharanat@gmail.com

