

ชิปอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการตรวจวัดความเข้มข้นของคลอรีน โดยใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่

Electrowetting-Based Chip for Monitoring Chlorine Concentration Using Mobile Phones

ปภาอร สิริบุญบันดาล และปกรณ์ ปรีชาบุรณะ*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

อิโรอะกิ ซูซูกิ

บัณฑิตวิทยาลัยวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยทสึคุบะ
1-1-1 เทนโนได เมืองทสึคุบะ จังหวัดอิบารากิ 305-8573 ประเทศญี่ปุ่น

Papaorn Siribunbandal and Pakorn Preechaburana*

Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University,
Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Hiroaki Suzuki

Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบของไหลจุลภาคให้สามารถผสมสารละลายแบบอัตโนมัติบนชิปโดยใช้หลักการของ วาล์วอิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้างของวาล์วประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าทองและช่องทางไหลจุลภาคที่ทำด้วยวัสดุโพลีไดเมทิลซิลอกซ์เซน เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นตัวแยกสารละลายเอาไว้ที่บริเวณการผสม วาล์วจะเปิดเมื่อสารละลาย อิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ผ่านขั้วไฟฟ้าสังกะสีของเซลล์ไฟฟ้าเคมีซึ่งอยู่ที่ปลายช่องทางไหลจุลภาค ทำให้ศักย์ไฟฟ้า จำนวน -0.82 V ถูกป้อนไปยังขั้วไฟฟ้าทองที่ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าผสมเนื่องจากการเชื่อมต่อกับเซลล์ไฟฟ้าเคมี ผลที่เกิดขึ้นจะทำให้พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทองเปลี่ยนสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิกและวาล์วจะเปิดอัตโนมัติ ทำให้สารละลายทั้งสองผสมกันภายในบริเวณการผสม เพื่อแสดงการประยุกต์ใช้ชิปอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงเพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของคลอรีนจากภาพที่ถ่ายโดยใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยหยดสารละลายคลอรีนในช่องใส่สารด้านหนึ่ง ก่อน จากนั้นนำสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์-น้ำแข็งที่ผสมกับโพแทสเซียมคลอไรด์สำหรับใช้เป็นสารละลาย อิเล็กโทรไลต์หยดในช่องใส่สารที่มีขั้วไฟฟ้า Ag/AgCl แล้วจะเคลื่อนที่ไปที่ปลายช่องทางไหลด้วยแรงคาปิลลารี ในชั้น

*ผู้รับผิดชอบบทความ : ppakorn@tu.ac.th

นี้สารละลายจะถูกกั้นด้วยไมโครปีลาร์และจะผสมกันอย่างอัตโนมัติเมื่อวาล์วถูกเปิด จากการทดลองได้แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนสีกับค่าความเข้มข้นของคลอรีนในช่วง 0.2-20.0 ppm

คำสำคัญ : ห้องปฏิบัติการบนชิป; อิเล็กโทรเวทติ้ง; การตรวจวัดคลอรีน; ระบบของไหลจุลภาค; โทรศัพท์เคลื่อนที่

Abstract

In this research, microfluidic lab-on-a-chip (LOC) devices were developed to perform autonomous mixing on a single chip using an electrowetting-based valve. A structure of the valve was composed of a gold electrode and a polydimethylsiloxane (PDMS) microchannel to separate solutions in a mixing area. The valve was opened when an electrolyte solution reached a zinc electrode of an electrochemical cell at the end of the flow channel. The potential of the mixing electrode (Au) was changed to -0.82 V since the cell was electrically connected to the valve. As a result, the mixing electrode becomes hydrophilic making the valve opened and then two solutions were mixed inside the mixing area. To demonstrate the applicability of the electrowetting-based LOC device, the colorimetric detections for the analysis of chlorine concentration using mobile phone camera were performed. A chlorine solution was filled in a PDMS microchannel and another solution containing Potassium Iodide-Starch solution in potassium chloride (KCl) being electrolyte solution was dropped on Ag/AgCl electrode and transported by capillary action in an another PDMS microchannel. The solutions were confined outside the mixing area by micropillar structures and then were mixed by the automatic operation at mixing area when the valve opened. The experimental results showed the calibration curve of the color ratios with corresponding 0-20 ppm chlorine concentrations.

Keywords: lab-on-a-chip; electrowetting; chlorine measurement; microfluidic; mobile phone

1. บทนำ

ปัจจุบันระบบไมโครฟลูอิดิกกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารทั้งด้านอุตสาหกรรมอาหารและด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การตรวจวัดปริมาณกลูโคส [1,2] การตรวจวัดปริมาณผงชูรส [3,4] การตรวจวัดปริมาณยูเรีย [5,6] และการตรวจวัดแอมโมเนีย [5,7] เป็นต้น ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลาย ๆ กลุ่มที่พยายามออกแบบและผลิตเครื่องมือตรวจวิเคราะห์ที่ใช้ร่วมกับ

ระบบไมโครฟลูอิดิก โดยทำให้มีประสิทธิภาพในระดับที่ยอมรับได้ ราคาไม่แพง และอยู่ในรูปแบบที่สามารถพกพาได้ [8-10] ซึ่งหลักการออกแบบจะทำให้ตัวตรวจวัดหรือชิปสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ผู้บริโภค (consumer electronic device) หรือ CED ตัวอย่างอุปกรณ์ CED ที่ใช้ในงานวิจัยดังกล่าว ได้แก่ เครื่องสแกนเนอร์ [11,12] เครื่อง CD/DVD ไดรฟ์ [13-16] และเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีกล้องเว็บแคม [17]

เนื่องจากอุปกรณ์ CED เหล่านี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายอยู่แล้วในปัจจุบัน ดังนั้นการใช้ CED เป็นตัวช่วยในการตรวจวัดจึงสามารถลดราคาของเครื่องมือลงได้อย่างมาก เพราะการผลิตเครื่องตรวจวัดจะจำกัดอยู่แค่การพัฒนาตัวชิปเซนเซอร์และอุปกรณ์ทางแสงเพียงอย่างเดียว ส่วนเครื่องมือในการอ่านค่า แหล่งกำเนิดแสง ตัวเก็บข้อมูล และตัวประมวลผล สามารถประยุกต์ให้อุปกรณ์ CED ทำหน้าที่เหล่านั้นได้

โทรศัพท์เคลื่อนที่ก็เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ CED ที่มีใช้กันอยู่ทั่วไปเกือบทุกมุมโลก อีกทั้งโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นใหม่ๆ ปัจจุบันยังมาพร้อมกับตัวประมวลผลที่มีประสิทธิภาพและตัวเซนเซอร์หลาย ๆ แบบ ได้แก่ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น เซนเซอร์วัดความสว่าง เซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว และเซนเซอร์ตรวจจับการหมุนของเครื่อง เป็นต้น รวมทั้งประสิทธิภาพโดยรวมของโทรศัพท์เคลื่อนที่ก็ใกล้เคียงคอมพิวเตอร์พกพา จึงได้มีผู้วิจัยหลาย ๆ กลุ่มทั่วโลกพยายามใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นตัวตรวจวัดต่าง ๆ ที่สามารถเข้าถึงผู้ใช้ทั่วโลกได้ง่ายขึ้น และยังสามารถลดจำนวนงานบริการที่จะต้อง ตรวจวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการหรือที่โรงพยาบาลลงได้ ตัวอย่าง เช่น การใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นตัวตรวจวัดสารเคมีในแหล่งน้ำหรือในอาหาร

งานวิจัยก่อนหน้านี้ของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) ได้ตรวจวัดคลอรีนในน้ำด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยอาศัยหลักการวัดการเปลี่ยนแปลงของสีเทียบกับความเข้มข้นของคลอรีน [18] อย่างไรก็ตาม ระบบดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ปริมาณสารที่จะตรวจวัดในระดับมิลลิลิตร และต้องผสมสารที่จะตรวจวัดกับสารที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนสี โดยการผสมของสารดังกล่าวจะต้องทำภายนอกชิป ซึ่งผู้วิจัยมีแนวคิดว่าจะมีการใช้ระบบไมโครฟลูอิดิกเพื่อลดปริมาณของสารที่

จำเป็นต้องใช้ตรวจวัดให้อยู่ในระดับไมโครลิตร และยังสามารถออกแบบให้มีการผสมกันของสารภายในชิปได้ เพื่อลดความยุ่งยากของการตรวจวัด กลุ่มวิจัยที่มหาวิทยาลัยสก็อตมีการใช้ระบบไมโครฟลูอิดิกแบบที่สามารถผสมสารสองชนิดได้แบบอัตโนมัติ ด้วยหลักการอิเล็กโทรเวทติ้ง (electro-wetting) [19] โดยจะใช้ปริมาณของสารในระดับไมโครลิตร และผสมสารภายในชิป แต่ก็ยังมีข้อจำกัดตรงที่จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอกต่อเข้ากับระบบไมโครฟลูอิดิกเพื่อเปิดวาล์ว และจะต้องตรวจวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อถ่ายภาพแล้วหาค่าความเข้มข้นของสารจากภาพถ่าย ถ้าต้องการตรวจวัดภายนอกห้องปฏิบัติการจะมีความยุ่งยากมาก ถึงแม้ว่าอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกที่สร้างขึ้นจะมีประสิทธิภาพ แต่ขาดความคล่องตัวในการตรวจวัดนอกห้อง ปฏิบัติการ เพราะไม่สะดวกในการนำกล้องจุลทรรศน์และแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอกไปใช้เพื่อการตรวจวิเคราะห์สารในสถานที่ต่าง ๆ นอกห้องปฏิบัติการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะออกแบบสร้างชิปที่มีการเคลื่อนที่ของสารละลายในระบบไมโครฟลูอิดิกซึ่งอยู่บนพื้นฐานการไหลที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติด้วยแรงคาปิลลารี และควบคุมการผสมกันของสารละลายแบบอัตโนมัติในระบบของไหลจุลภาคโดยการใช้อวาล์วอิเล็กโทรเวทติ้งร่วมกับเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกและออกแบบให้สามารถตรวจวัดได้บนโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อเพิ่มความสะดวกในการตรวจวัดสารภายนอกห้องปฏิบัติการ และตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการตรวจวัดในกรณีนี้ ได้มีการออกแบบให้ระบบมีความเหมาะสมกับการตรวจวัดคลอรีนโดยอาศัยหลักการตรวจวัดการเปลี่ยนสี (colorimetric detection) ที่ใช้กล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่ในการอ่านผลการตรวจวัด สำหรับเหตุผลที่เลือกตรวจวัดคลอรีนเนื่องจากคลอรีนเป็นสารเคมีที่มีประสิทธิภาพสูง

สำหรับใช้ฆ่าเชื้อโรค ที่สามารถนำไปใช้ในด้านต่าง ๆ มากมาย ทั้งในด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรม ตลอดจนสาธารณสุข ไม่ว่าจะเป็นการฆ่าจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตน้ำ ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม ในฟาร์มเลี้ยงปศุสัตว์ ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำ ในสระว่ายน้ำ รวมทั้งใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ เพราะสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ดี และสามารถสลายตัวได้อย่างรวดเร็วในธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามความปลอดภัยในการใช้น้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของคลอรีนที่หลงเหลืออยู่ในน้ำ ตัวอย่าง เช่น ปริมาณคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่มของสัตว์ค่าที่ปลอดภัยไม่ควรเกิน 14.0 ppm [20] ในขณะที่ปริมาณคลอรีนในน้ำประปาที่ปลอดภัยต่อการอุปโภคบริโภคคือระหว่าง 0.2-0.5 ppm [21] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีความสนใจสร้างชิปอิเล็กทรอนิกส์เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของคลอรีนในน้ำ

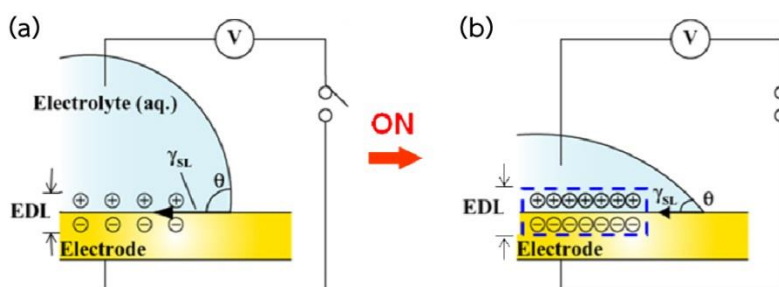
2. ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์โทรเวทิง

ปรากฏการณ์อิเล็กทรอนิกส์โทรเวทิงนี้เป็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงความสามารถที่ทำให้เปียกได้ของพื้นผิววัสดุพวกโลหะ ได้แก่ ทอง (Au) แพลตตินัม (Pt) อลูมิเนียม (Al) อินเดียมทินออกไซด์ (ITO) เป็นต้น ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้า

ก่อนที่จะทำความเข้าใจเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์โทรเวทิงควรทราบเกี่ยวกับการเปียก (wetting) รูปที่ 1a แสดงหยดของเหลววางนิ่งบนพื้นผิวในลักษณะสมดุลโดยจะมีแรง 3 แรง ซึ่งแต่ละแรง มีหน่วยเป็น N/m โดยที่ γ_{SG} คือ ความตึงผิวของสถานะของแข็งกับสถานะก๊าซ γ_{SL} คือ ความตึงผิวระหว่างสถานะของแข็งกับสถานะของเหลว γ_{LG} คือ ความตึงผิวของสถานะของเหลวกับสถานะก๊าซ และ θ คือ มุมสัมผัส (contact angle) ซึ่งเป็นมุมที่วัดระหว่าง γ_{SL} กับ γ_{LG} สำหรับความตึงผิว (surface tension) จะมีความสัมพันธ์กับการเปียก โดยหาก γ_{SL} มีค่ามากนั้นหมายความว่าของเหลวมีความสามารถในการเปียกต่ำบนผิวของแข็ง ดังนั้นมุมสัมผัสจะมีค่ามากโดยสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 1 (สมการของ Young [22]) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตึงผิวกับมุมสัมผัส คือ

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad (1)$$

รูปที่ 1b แสดงหยดของเหลวในสภาพแผ่กระจายเมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้ากับหยดของเหลว โดยให้ศักย์ลบกับขั้วไฟฟ้าและศักย์บวกกับหยดของเหลว ทำให้หยดของเหลวมีมุมสัมผัสลดลง บ่งบอกว่าพื้นผิวของแข็งหรือขั้วไฟฟ้านั้นมีลักษณะเปลี่ยนไปจากคุณลักษณะไม่ชอบน้ำหรือไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) เป็นคุณลักษณะชอบน้ำหรือไฮโดรฟิลิก (hydrophilic)



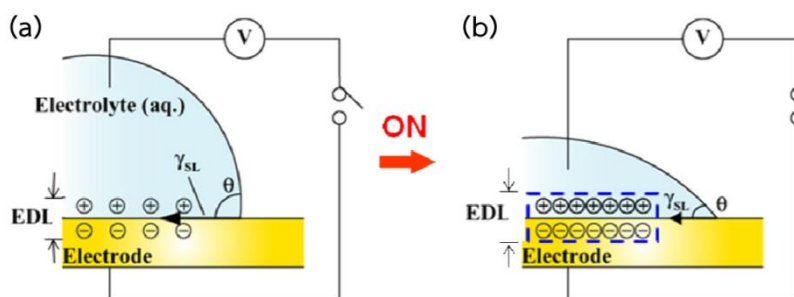
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความตึงผิวกับมุมสัมผัส (a) ของเหลวในสภาพเป็นหยด และ (b) ของเหลวในสภาพแผ่กระจาย

เนื่องจากปรากฏการณ์อิเล็กโทรเวทิงเป็นวิธีที่ใช้ในการปรับความตึงผิวของวัสดุให้มีค่าลดลงเมื่อมีการป้อนความต่างศักย์ระหว่างหยดสารละลายและขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยรูปที่ 2a เป็นรูปก่อนให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างหยดสารละลายและขั้วไฟฟ้า หยดสารละลายวางอยู่เหนือพื้นผิวขั้วไฟฟ้าที่มีสมบัติไฮโดรโฟบิกซึ่งมีความเป็นขั้วต่ำ จะเห็นว่ารูปร่างของหยดสารละลายมีลักษณะค่อนข้างกลมบ่งบอกถึงความตึงผิวระหว่างขั้วไฟฟ้ากับของเหลวมีค่ามาก เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้ากับหยดสารละลายโดยให้ลบกับขั้วไฟฟ้าและบวกกับหยดของเหลว ณ เวลานี้พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าจะถูกชาร์จด้วยประจุที่เป็นลบมากขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า (electrode) ในบริเวณชั้น electric double layer (EDL) ซึ่งชั้นนี้ถูกสร้างขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลาย และประจุลบที่ชั้น EDL นี้จะไปเหนี่ยวนำเฉพาะขั้วบวกของโมเลกุลของของเหลวในหยดสารละลายให้มีประจุเป็นบวกมากขึ้นที่บริเวณชั้น EDL ดังรูปที่ 2b เกิดการสะสมของไอออนที่บริเวณผิวหน้าที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย (electrode solution interface) เรียกกระบวนการเช่นนี้ว่าการโพลไรซ์ขั้วไฟฟ้า (polarized electrode) ให้ประจุไฟฟ้าในขั้วไฟฟ้านั้นเกิดการเรียงตัวอย่างเป็น

ระเบียบ จะเห็นว่าพลังงานพื้นผิว (surface energy) ถูกทำให้สมดุลด้วยพลังงานไฟฟ้า (electrical energy) และ γ_{SL} ถูกทำให้ลดลงด้วยเช่นกัน เมื่อเทียบกับ γ_{SL}^0 ซึ่งเป็นความตึงผิวระหว่างสถานะของแข็งกับสถานะของเหลวก่อนให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า ในขณะที่ γ_{SG} และ γ_{LG} จะไม่เปลี่ยนแปลงแม้ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือไม่ก็ตามซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2 (สมการของ Lippmann [23]) โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตึงผิวระหว่างสถานะของแข็งกับสถานะของเหลวที่เปลี่ยนแปลงภายหลังให้แรงดันไฟฟ้า โดยที่ C คือ ความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของชั้น EDL จากสมการที่ 3 (สมการของ Lippmann-Young) บ่งบอกว่ามุมสัมผัสจะมีค่าลดลงภายหลังการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างหยดสารละลายและขั้วไฟฟ้า หยดของสารละลายจะเปียกบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้า นั่นคือพื้นผิวขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นไฮโดรฟิลิกซึ่งจะมีความเป็นขั้วสูง จะเห็นว่ารูปร่างของหยดของสารละลายมีลักษณะค่อนข้างกระจายตัว

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SL}^0 - \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{1}{\gamma_{LG}} \frac{1}{2} CV^2 \quad (3)$$



รูปที่ 2 อธิบายปรากฏการณ์ไดเร็กอิเล็กโทรเวทิง (a) หยดของเหลวขนาดเล็กบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้ากับมุมสัมผัสที่มีค่ามาก และ (b) หลังจากให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างหยดของเหลวกับขั้วไฟฟ้าทำให้มุมสัมผัสของของเหลวมีค่าลดลง

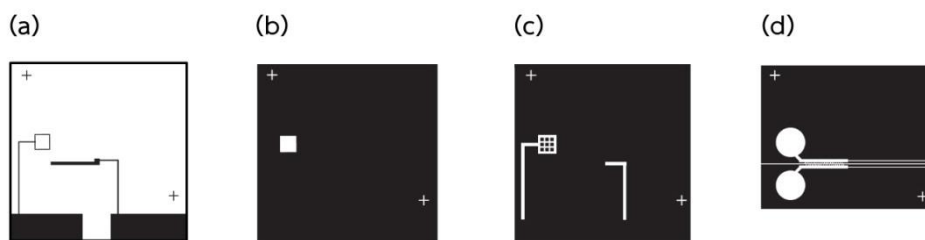
3. วิธีการวิจัย

3.1 การสร้างชิปอิเล็กทรอนิกส์

ชิปอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการสร้างดังนี้

3.1.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าลงบนแผ่นฐานแก้ว (กระจก) ขั้นแรกเริ่มจากทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นกระจก โดยแช่ใน piranha solution (H_2SO_4 และ H_2O_2) เป็นเวลา 10 นาที นำมาล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้ง จากนั้นไล่ความชื้นที่ผิวหน้าของกระจก โดยนำไปวางบน hot plate หรือนำไปอบที่อุณหภูมิ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงเคลือบฟิล์มบางโครเมียม/ทอง (Cr/Au) ลงบนแผ่นกระจกโดยวิธีสปัตเตอริง (sputtering) จะได้กระจกที่มีชั้นทอง

เคลือบอยู่ด้านบนชั้นโครเมียม จากนั้นเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก S-1818 ด้วยความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อให้ได้ฟิล์มไวแสง ต่อมานำฟิล์มที่ออกแบบเพื่อการสร้างขั้วไฟฟ้าโครเมียมและทองดังแสดงในรูปที่ 3a มาวางทาบบนชิ้นงาน และนำไปฉายแสงตามลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ด้วยเครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 405 nm ด้วยความเข้มแสง 10 mW/cm^2 เป็นเวลา 60 วินาที หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปล้างฟิล์มไวแสงออก (developer) เมื่อได้รูปแบบที่ต้องการแล้วจึงนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วเป่าแห้งจะได้แผ่นแม่แบบซึ่งพร้อมจะนำไปกัดเอาทองและโครเมียมส่วนเกินออก (etching)



รูปที่ 3 รูปตัวอย่างฟิล์มแม่แบบอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกชิปที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (a) Cr/Au (b) Ag (c) Insulating และ (d) SU-8

สำหรับขั้นตอนการกัดทองและโครเมียมส่วนเกินออกนั้น ขั้นตอนแรกเตรียมสารเพื่อใช้ในการกัดทองและโครเมียมก่อน สำหรับสารที่ใช้ในการกัดทองจะใช้โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) จำนวน 10 g ไอโอดีนคริสตัล (I_2) จำนวน 2.5 g ผสมลงในน้ำกลั่น 100 ml (4:1:40) ในขณะสารที่ใช้ในการกัดโครเมียมจะเตรียมด้วยการใช้ NaOH จำนวน 12.5 g โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$) จำนวน 25 g ผสมลงในน้ำกลั่น 100 ml (1:2:8) จากนั้นนำชิ้นงานลงไปแช่ในน้ำยากัดทองที่เตรียมไว้จนกระทั่งสังเกตเห็นชั้นของโครเมียม แล้วจึงนำไปล้าง

ด้วยน้ำกลั่นและอะซิโตนตามลำดับ แล้วเป่าแห้ง จากนั้นนำชิ้นงานลงไปแช่ในน้ำยากัดโครเมียมที่เตรียมไว้จนกระทั่งบริเวณที่เป็นชั้นของโครเมียมส่วนเกินถูกกัดออกหมด แล้วจึงนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นและเป่าแห้ง เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนนี้จะได้โครงสร้างของขั้วไฟฟ้าที่ทำด้วยทองตามที่ออกแบบไว้ดังแสดงในรูปที่ 3a

จากนั้นเคลือบชิ้นงานด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก S-1818 และฉายแสงตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ด้วยเครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเลตด้วยวิธีเดียวกันกับข้างต้นเพียงแต่เปลี่ยนเป็นการใช้ฟิล์มที่ออกแบบเพื่อการสร้างขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์ (Ag) มาวางทาบบนชิ้นงาน

แทน (รูปที่ 3b) แล้วจึงนำชิ้นงานไปล้างฟิล์มไวแสงออก จากนั้นสร้างซิลเวอร์ให้อยู่บนชิ้นงาน โดยวิธีสปัตเตอริง และทำความสะอาดชั้นฟิล์มที่ปิดอยู่บนชิ้นงานออกด้วยอะซิโตน เพื่อที่จะสร้างโครงสร้างของการป้องกันของทางเดินสายไฟขนาดเล็ก (insulating layer) ในระบบชิพ จึงเคลือบชิ้นงานด้วย OMR 83 ซึ่งเป็นน้ำยาไวแสงชนิดลบ จากนั้นฉายแสงตามลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ด้วยเครื่องฉายแสงอัลตรา ไวโอเลตด้วยวิธีเดียวกันกับข้างต้นเพียงแต่เปลี่ยนเป็นการใช้ฟิล์มที่ออกแบบเพื่อการสร้างโครงสร้าง insulating layer มาวางทาบบนชิ้นงานแทน (รูปที่ 3c) จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปล้างฟิล์มไวแสงออก จะเห็นได้ว่าพื้นที่อื่น ๆ นอกเหนือไปจากแขนเนลจะคลุมไปด้วยฟิล์มไวแสงชนิดลบที่มีสมบัติไฮโดรโฟบิก เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการซึมผ่านของสารละลาย

สำหรับขั้วไฟฟ้าที่ทำด้วยสังกะสี (Zn) จะถูกเคลือบหุ้มชั้นทองโดยใช้การเคลือบด้วยกระบวนการอิเล็กโทรเพลต (electroplate) ด้วยการให้กระแสไฟฟ้า 50 μA จากเครื่องโพเทนทีโอสเตท/กัลวานอสเตท (potentiostat/galvanostat) เป็นเวลา 20 นาที ในสารละลายซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) ที่มีความเข้มข้น 1.8 M และในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ที่มีความเข้มข้น 4.9 M ที่อุณหภูมิ 35 $^{\circ}\text{C}$ และสำหรับขั้วไฟฟ้าที่ทำด้วยซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) จะสร้างให้มีรูปแบบเป็นช่องทั้งหมด 9 ช่องด้วยวิธีการออกซิเดชัน โดยการให้กระแสไฟฟ้า 3 μA เป็นเวลา 5 นาที ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 M ที่อุณหภูมิ 25 $^{\circ}\text{C}$ พื้นที่อื่น ๆ นอกเหนือไปจากแขนเนลจะคลุมไปด้วยฟิล์มไวแสงชนิดลบที่มีสมบัติไฮโดรโฟบิกเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการซึมผ่านของสารละลายเข้าไปในแขนเนล

3.1.2 การเตรียม PDMS ไมโครแขนเนล

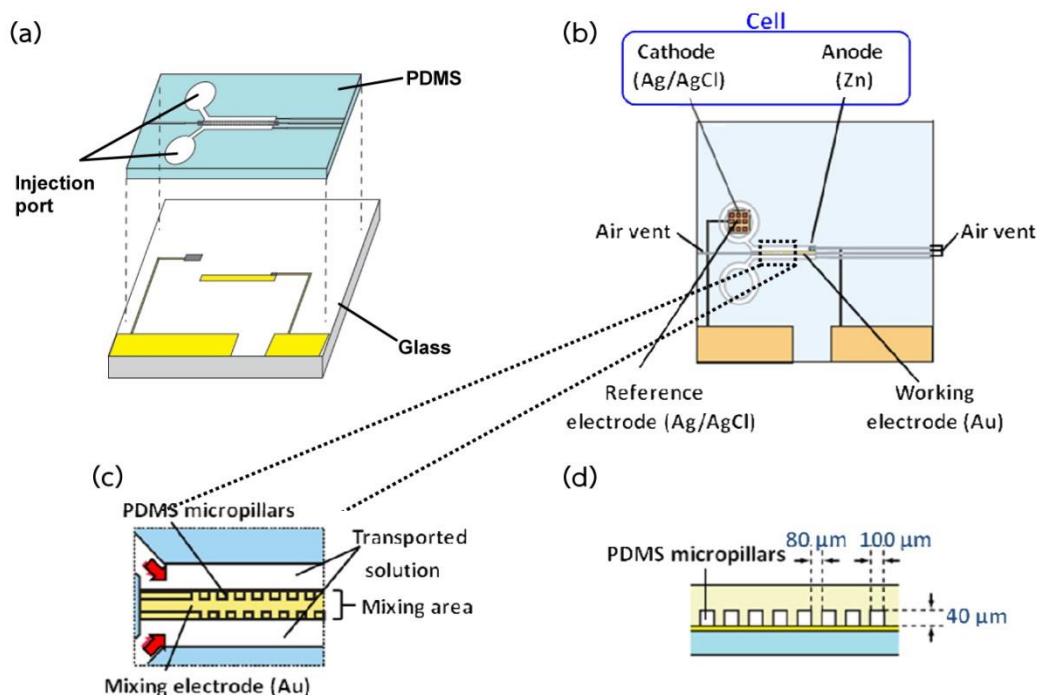
กระบวนการในการสร้าง PDMS ไมโคร

แขนเนลที่มีความกว้าง 300 μm และความสูง 40 μm บนแผ่นชิป ขั้นแรกเริ่มจากการสร้างแม่แบบด้วยฟิล์มบางไวแสงชนิดลบ SU-8 โดยเริ่มจากการทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นกระจกด้วยการแช่ใน piranha solution (H_2SO_4 และ H_2O_2) เป็นเวลา 10 นาที นำมาล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้ง ใส่ความชื้นที่ผิวหน้าของกระจกโดยวางบนเครื่องให้ความร้อน (hot plate) หรือนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที เคลือบด้วยน้ำยาไวแสงชนิดลบ SU-8 (SU-8 25) ด้วยความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 วินาที เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความหนา 40 μm นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 65 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 5 นาที และ 95 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำไปฉายแสงตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้ (รูปที่ 3d) โดยนำแผ่นฟิล์มวางทาบบนชิ้นงาน ฉายแสงด้วยเครื่องฉายแสงอัลตรา ไวโอเลต เป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 65 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 นาที และ 95 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 5 นาที ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปล้างฟิล์มไวแสงออก เมื่อได้รูปแบบที่ต้องการแล้วจึงนำไปล้างด้วยไอโซโพรพานอล (isopropanol) แล้วเป่าแห้ง เพื่อให้ น้ำยาไวแสงติดกับแผ่นฐานรองรับดีซีเอ็น จึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 5 นาที เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการนี้จะได้แม่พิมพ์ด้วยน้ำยาไวแสงชนิดลบ SU-8 เพื่อใช้เป็นแม่แบบในการหล่อชิปขึ้นรูปต่อไปด้วยโพลิเมอร์ PDMS (polydimethylsiloxane)

การเตรียม PDMS สำหรับถอดแบบเริ่มจากการเตรียมโพลิเมอร์ PDMS ที่มีส่วนผสมระหว่างซิลิโคนใส (PDMS base) กับตัวทำให้แข็ง (hardener) ในอัตราส่วนน้ำหนัก 10 : 1 โดยคนให้เข้ากัน แล้วกำจัดฟองที่เกิดขึ้นระหว่างการคนส่วนผสมให้เข้ากันด้วยปั๊มสุญญากาศ โดยระยะเวลาในการดูดเอาฟองออกขึ้นกับความแรงของปั๊มและปริมาณฟองอากาศ จากนั้นนำ PDMS มาเทลงบนแม่แบบ แล้วนำ

ขึ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ PDMS แข็งตัว แล้วจึงลอก PDMS ที่แข็งตัวแล้วออกจากแม่แบบ จากนั้นตัดขอบ PDMS และเจาะรูสำหรับช่องใส่สาร แล้วจึงนำ PDMS ไปวางบนแผ่นแก้วที่สร้างขั้วไฟฟ้าไว้แล้วดังแสดงในรูปที่ 4a โดยต้องมีการจัดวางตำแหน่งให้ถูกต้องบนบล็อกจลทรรศน์ (รูปที่ 4b) สุดท้ายจะได้ชิปอิเล็กโทรเวทิงที่มีขนาด 18

mm x 18mm โดยมีท่อการไหลจุลภาคแบบสองท่อที่มีช่องเปิดสำหรับใส่สารละลายที่ต้องใช้ในการตรวจวัดที่ปลายของท่อจะมีช่องเปิดเล็ก ๆ สำหรับเป็นช่องทางออกของอากาศ (air vent) จำนวน 4 ช่อง เพื่อใช้ลดความดันภายในท่อให้ของเหลวสามารถไหลภายในท่อได้



รูปที่ 4 โครงสร้างของชิปอิเล็กโทรเวทิง (a) การประกอบระบบไมโครฟลูอิดิกส์บนแผ่นกระจกที่เคลือบด้วยอิเล็กโทรดทอง (b) แผนภาพโครงสร้างของอิเล็กโทรเวทิงชิปที่สมบูรณ์ (c) รูปขยายบริเวณพื้นที่ที่มีการผสม และ (d) รูปขยายภาคตัดขวางบริเวณพื้นที่ที่มีการผสม

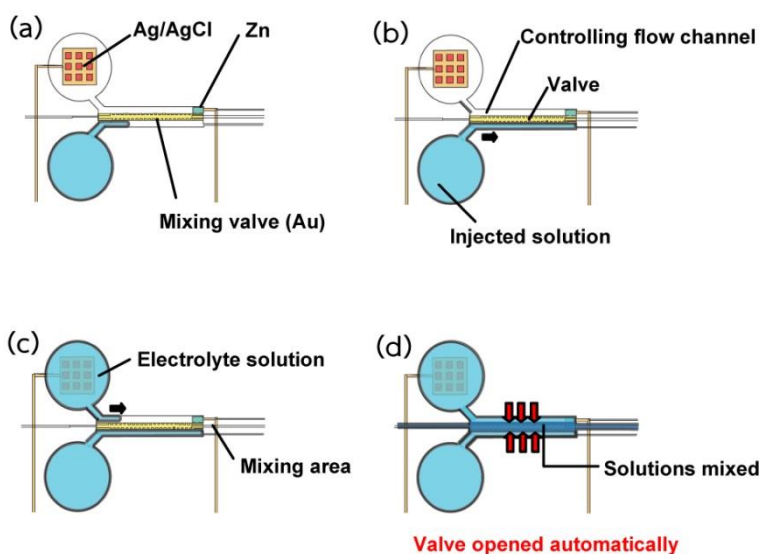
แผ่นชิปในงานวิจัยนี้ คู่ของขั้วไฟฟ้าที่ทำด้วยสังกะสีและขั้วไฟฟ้าที่ทำด้วยซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์สร้างเป็นรูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เกิดปฏิกิริยาเคมีแล้วให้กระแสไฟฟ้า โดยที่ขั้วไฟฟ้าสังกะสีทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดซึ่งเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดซึ่งเป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยขั้วไฟฟ้า

สังกะสีจะทำหน้าที่ถ่ายเทอิเล็กตรอนให้กับขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เพื่อให้เกิดศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบสองขั้วไฟฟ้าเพื่อควบคุมการทำงานของวาล์วผสม (mixing valve) โดยขั้วไฟฟ้าที่ทำด้วยทองที่สร้างอยู่ระหว่างสองแขนเนลเป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นวาล์วเปิด-ปิด โดยใช้ร่วมกับ

ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ซึ่งใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) เพื่อที่จะบ่งบอกถึงความเสถียรของค่าความต่างศักย์ ขั้วไฟฟ้าทำงานมีขนาดความยาว 5 mm และความกว้าง 300 μm ถูกสร้างเพื่อแยกสองสารละลายออกจากกันก่อนที่จะเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะให้ศักย์ไฟฟ้าแก่วาล์วผสม นอกจากนี้ที่บริเวณพื้นที่ที่มีการผสม (mixing area) จะสร้างแนวของ PDMS ไมโครปิลาร์ (PDMS micropillar) เพื่อที่จะป้องกันสองสารละลายจากการไหลเข้าไปในบริเวณอื่น (รูปที่ 4c) ไมโครปิลาร์นี้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมที่มีขนาด $100 \times 80 \mu\text{m}^2$ และระยะห่างระหว่างปิลาร์แต่ละอัน (ขอบถึงขอบ) คือ 100 μm (รูปที่ 4d) contact pads ใช้เพื่อตรวจวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ป้อนให้กับวาล์วเท่านั้นและไม่ได้ใช้สำหรับควบคุมของการไหลในระบบไมโครฟลูอิดิกชิป

3.2 หลักการและกระบวนการของกลไกการทำงานของวาล์วอัตโนมัติ

รูปที่ 5 แสดงการทำงานของวาล์วอัตโนมัติ เริ่มจากการใส่สารละลายที่หนึ่งลงในช่องใส่สารด้านล่าง (รูปที่ 5a) สารละลายจะเคลื่อนที่ด้วยแรงคาปิลลารีไปถึงบริเวณผสมสาร (รูปที่ 5b) ในขั้นนี้สารละลายจะถูกกั้นด้วยไมโครปิลาร์ หลังจากนั้นสารละลายที่สองที่ผสมสารอิเล็กโทรไลต์แล้ว ถูกเติมเข้าสู่ช่องใส่สารด้านบนที่มีขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์อยู่ (รูปที่ 5c) เมื่อขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์ถูกปกคลุมไปด้วยสารละลาย เซลล์จะถูกกระตุ้นและป้อนศักย์ไฟฟ้าไปยังวาล์วที่เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน ผลก็คือผิวของขั้วไฟฟ้าจะเปลี่ยนสมบัติจากไฮโดรโฟบิกเป็นไฮโดรฟิลิก วาล์วจะเปิดอัตโนมัติและสารละลายทั้งสองจะผสมกันดังรูปที่ 5d



รูปที่ 5 หลักการทำงานของวาล์วอัตโนมัติ (a) ใส่สารละลายที่หนึ่งลงในช่องใส่สาร (b) สารละลายเคลื่อนที่ไปยังบริเวณผสมสาร (c) สารละลายที่สองที่ผสมสารอิเล็กโทรไลต์ถูกใส่เข้าสู่แขนหลอดควบคุม และ (d) วาล์วเปิดอัตโนมัติและสารละลายทั้งสองผสมกัน

3.3 หลักการตรวจวัดความเข้มข้นของคลอรีนโดยใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่

งานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยใช้สารละลายรีเอเจนต์ที่เป็นตัวที่ทำให้คลอรีนเกิดการเปลี่ยนสีไปตามความ

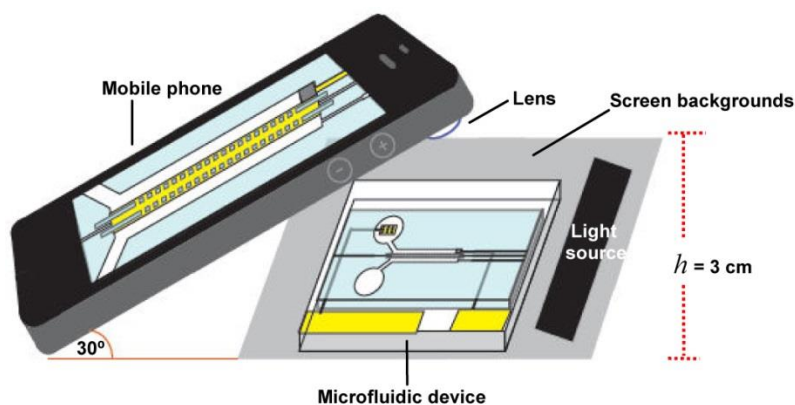
เข้มข้น คือ สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์-น้ำแป้ง (KI-starch solution) ที่ผสมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ซึ่งความเข้มข้น 0.1 M ทำหน้าที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดสอบสารละลายคลอรีนที่มีความเข้มข้นต่างกัน โดยมีความเข้มข้นในช่วง 0.2-20.0 ppm เนื่องจากปริมาณคลอรีนในน้ำประปาที่ปลอดภัยต่อการอุปโภคบริโภคมีค่าระหว่าง 0.2-0.5 ppm ในขณะที่ความเข้มข้นของคลอรีนที่ปลอดภัยต่อการอุปโภคบริโภคของสัตว์คือไม่ควรเกิน 14.0 ppm ดังนั้นจึงศึกษาความเข้มข้นของคลอรีนในช่วง 0.2-20.0 ppm

การตรวจวัดความเข้มข้นของคลอรีนด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถทำได้โดยใช้กล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ (iPhone 5) ถ่ายภาพชิปที่บรรจุคลอรีนที่ต้องการวัดความเข้มข้น โดยมีการจัดการทดลองดังรูปที่ 6 หลักการในการตรวจวัดจะเลือกบริเวณของรูปภาพที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสีของสารในไมโครแชนเนล ซึ่งเป็นบริเวณที่สารผสมกัน จากนั้นจะวิเคราะห์ค่าสีจากภาพที่ถ่ายได้เพื่อเปลี่ยนเป็นความเข้มข้นของคลอรีน (colorimetric detection) โดยใช้สมการที่ 7 [18] ในการคำนวณหาอัตราส่วนสี (color ratio) โดยจะต้องหาค่าความเข้มสีเฉลี่ยจากสีหลักทั้ง 3 สี (RGB) ของตัวอย่างที่ได้มาจากข้อมูลสี ค่าความเข้มของสีหาได้จากการเลือก

ขอบเขตที่สนใจ (region of interest, ROI) ซึ่งจะได้เป็นข้อมูลเมตริก โดยข้อมูลแต่ละค่าคือความเข้มของสีในแต่ละพิกเซลของภาพ จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการวัด โดยจำเป็นต้องหาค่าความเข้มของสีพื้นหลังจากบริเวณที่กำหนดให้เป็นจุดอ้างอิง (reference) เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้สำหรับการคำนวณค่าอัตราส่วนสีจากสมการที่ 7 จนได้กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (calibration curve) ที่บอกถึงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนสีที่ตรวจวัดเทียบกับค่าความเข้มข้นของคลอรีนในช่วง 0.2-20.0 ppm

$$CR = \frac{R_s/R_r + G_s/G_r + B_s/B_r}{3} \quad (7)$$

โดยที่ CR คือ อัตราส่วนสี R_s คือ ค่าความเข้มสีเฉลี่ย (average color value) ของสีแดงในบริเวณขอบเขตภายในของรูปภาพบริเวณที่สนใจ G_s คือ ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของสีเขียวในบริเวณขอบเขตภายในของรูปภาพบริเวณที่สนใจ B_s คือ ค่าความเข้มสีเฉลี่ยของสีน้ำเงินในบริเวณขอบเขตภายในของรูปภาพบริเวณที่สนใจ R_r ค่าความเข้มสีพื้นหลังของบริเวณอ้างอิงของสีแดง G_r ค่าความเข้มสีพื้นหลังของบริเวณอ้างอิงของสีเขียว B_r ค่าความเข้มสีพื้นหลังของบริเวณอ้างอิงของสีน้ำเงิน



รูปที่ 6 แผนภาพการทดลองตรวจวัดความเข้มข้นของคลอรีนด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่เมื่อ h แทนความสูงจากระดับพื้นถึงเลนส์

โดยในการหากราฟความเข้มข้นมาตรฐานนั้นจะใช้คลอรีนที่ทราบความเข้มข้นใส่ลงไปในช่องใส่สารบนชิพและใส่สารที่ใช้ในการทดสอบคลอรีนในอีกช่องหนึ่ง เพื่อหาค่าอัตราส่วนสีที่สอดคล้อง เมื่อได้กราฟความเข้มข้นมาตรฐานแล้วจะสามารถใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นวัดค่าความเข้มข้นของคลอรีนของสารตัวอย่างจริงที่ไม่ทราบค่าความเข้มข้นได้

4. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

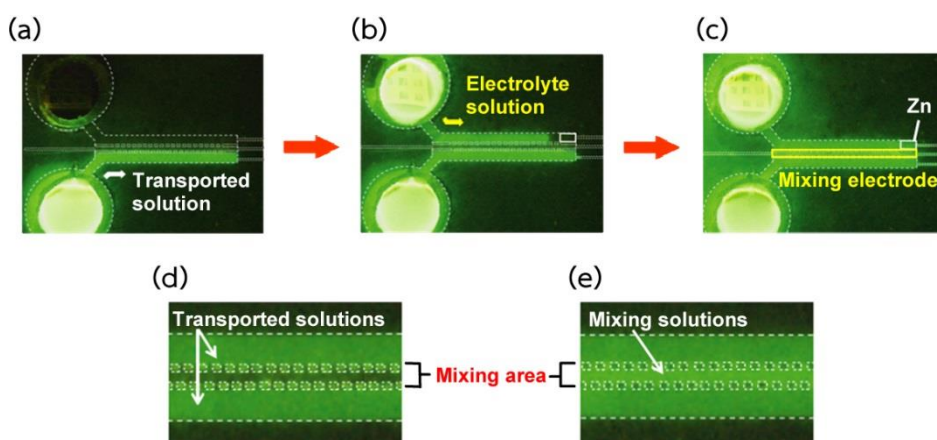
4.1 ทดสอบการทำงานของชิปอิเล็กโทรเวทิง

การทดสอบการทำงานของชิปอิเล็กโทรเวทิง สารที่ใช้ทดสอบการทำงานของชิปเป็นสารเรืองแสงสีเขียวที่เรียกว่าสารละลายฟลูออเรสซินที่มีความเข้มข้น 1 mM เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตการเคลื่อนที่และการผสมกันของสารละลายในไมโครแชนเนล โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบฟลูออเรสเซนซ์เป็นเครื่องมือในการทดสอบชิป สำหรับกระบวนการทำงานของชิปอิเล็กโทรเวทิง เริ่มต้นด้วยการเติมสารละลายที่หนึ่งลงไปในแชนเนลด้านล่างจนเคลื่อนที่ไปถึงด้านปลาย

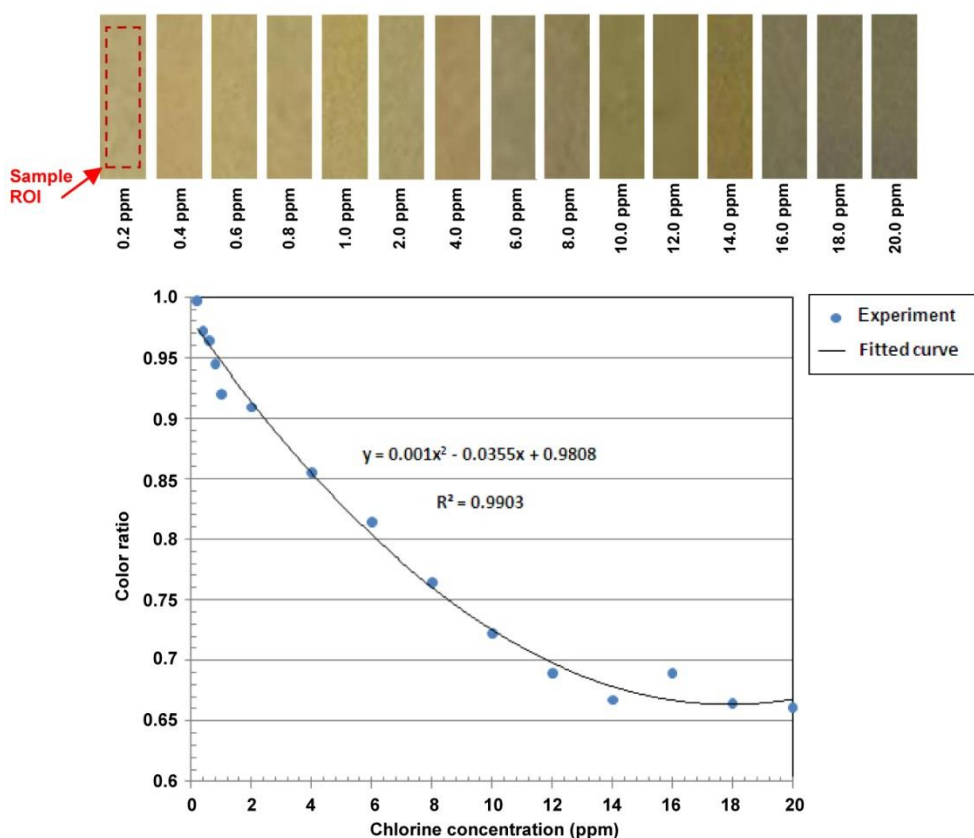
ของแชนเนล (รูปที่ 7a) ในขั้นนี้แนวของไมโครปิลาร์ที่สร้างขึ้นบริเวณพื้นที่การผสมของสารจะกั้นสารละลายไว้ไม่ให้ไหลออกมาในบริเวณที่ต้องการผสม จากนั้นเติมสารละลายที่สองซึ่งผสมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในแชนเนลควบคุม (รูปที่ 7b) เซลล์เกิดการกระตุ้นให้ศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น ผลคือสารละลายทั้งสองผสมกัน (รูปที่ 7c) เนื่องจากขั้วไฟฟ้าที่ทำด้วยทองเป็นขั้วไฟฟ้าทำงานที่ทำหน้าที่เป็นวาล์วผสมและขั้วไฟฟ้าที่ทำด้วยซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ขั้วไฟฟ้าทำงานถูกโพลาริซซ์กลายเป็นไฮโดรฟิลิก ผลลัพธ์คือวาล์วจะเปิดอัตโนมัติและสารละลายทั้งสองที่อยู่ระหว่างวาล์วจะรวมตัวกันและผสมกันอย่างอัตโนมัติ ซึ่งรูปที่ 7d และ รูปที่ 7e แสดงรูปขยายของบริเวณพื้นที่ของการผสมก่อนและหลังสารละลายที่มีการผสมกันตามลำดับ

4.2 การตรวจวัดความเข้มข้นของคลอรีน

เริ่มต้นด้วยการใส่คลอรีนปริมาณ 5 μL ลงในแชนเนล ต่อมานำสารละลายรีเอเจนต์ที่บรรจุสารละลาย 2 สารละลาย โดยสารละลายแรก คือ สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่มีความเข้มข้น 0.90



รูปที่ 7 การเคลื่อนที่ของสารเรืองแสงสีเขียว (ฟลูออเรสซิน) ของอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกสำหรับการผสมสาร (a) และ (b) แสดงรูปก่อนที่สารละลายทั้งสองในแชนเนลจะผสมกัน (c) แสดงรูปหลังผสม (d) แสดงรูปขยายก่อนผสม และ (e) แสดงรูปขยายหลังผสม



รูปที่ 8 การตรวจวัดคลอรีนบนชิปอิเล็กทรอนิกส์โทรเวทิงด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ รูปด้านบนเป็นภาพถ่ายของบริเวณผสมในแต่ละความเข้มข้นของคลอรีนจาก 0.2-20.0 ppm เส้นประแสดง ROI ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราส่วนสี รูปด้านล่างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนสีต่อความเข้มข้นของคลอรีน

M ในโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 M และสารละลายที่สอง คือ สารละลายน้ำแบ่งที่มีความเข้มข้น 0.25 M ในโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 M สารละลายทั้งสองผสมกันในอัตราส่วน 6.67:1 และมีปริมาตรรวม 5 μL ถูกเติมในแขนเนลอีกแขนเนลหนึ่งซึ่งเป็นแขนเนลควบคุม สารละลายทั้งสองเคลื่อนที่จากช่องใส่สารไปจนสุดช่องทางไหล เมื่อสารละลายรีเอเจนต์ที่บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าสู่แขนเนลควบคุมและเซลล์ไฟฟ้าถูกกระตุ้น สารละลายทั้งสองที่อยู่ระหว่างสองด้านของขั้วไฟฟ้าผสมจะเกิดการผสมกันอย่างอัตโนมัติและกระบวนการของปฏิกิริยาเคมีจะดำเนินต่อไปบนระบบชิป การ

ตรวจวัดโดยการตรวจสอบค่าสีจากภาพที่ถ่ายได้ บริเวณที่ผสมสารภายหลังจากที่สารทั้งสองผสมกันแบบอัตโนมัติเป็นเวลา 60 วินาที เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มสีในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา รูปที่ 8 รูปด้านบนคือภาพของบริเวณผสมที่ถ่ายจากโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มสีที่สอดคล้องกับความเข้มข้นของคลอรีนแตกต่างกันจำนวน 15 ความเข้มข้น โดยที่เส้นประแสดง ROI ของภาพ (50x125 พิกเซล) ในขณะที่ reference ROI จะเป็นฉากสีขาวของภาพ (50x125 พิกเซล) เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม science lab จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 8

ด้านล่าง ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสีกกับความเข้มข้นของคลอรีนในช่วง 0.2-20.0 ppm พบว่าอัตราส่วนสีมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของคลอรีนมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนตามสมการพหุนามกำลังสอง คือ $y = 0.001x^2 - 0.0355x + 0.9808$ โดยมีค่า $R^2 = 0.9903$

5. สรุป

สารละลายสามารถเคลื่อนที่และผสมกันด้วยกระบวนการอัตโนมัติในระบบของไหลจุลภาค โดยอาศัยแรงคาปิลลารีและการควบคุมการทำงานของวาล์วอัตโนมัติ วาล์วทำงานบนพื้นฐานของเทคนิคไดเรกอิเล็กทรอนิกส์และเซลล์ไฟฟ้าเคมี ขั้วไฟฟ้าที่ทำด้วยทอง สังกะสี และซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์สามารถที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ของสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มขั้วไฟฟ้าวงจรไฟฟ้าหรือแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก ในการตรวจวัดความเข้มข้นของคลอรีนน้้นกระบวนการทั้งหมดจะทำงานบนชิปและตรวจวัดด้วยการใช้การถ่ายภาพด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายที่มีความเข้มข้นของคลอรีนที่แตกต่างกันที่ผสมกับโพแทสเซียมไอโอไดด์-น้ำแป้ง งานวิจัยนี้ทำให้การตรวจวัดคลอรีนมีความสะดวกขึ้น โดยสามารถตรวจวัดนอกห้องปฏิบัติการได้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Srinivasan, V., Pamula, V.K and Fair, R.B., 2004, Droplet-based microfluidic lab-on-a-chip for glucose detection, *Anal. Chim. Acta*, 507: 145-150.
- [2] Yu, J., Ge, L., Huang, J., Wang, S. and Ge, S., 2011, Microfluidic paper-based chemiluminescence biosensor for simultaneous determination of glucose and uric acid, *Lab Chip* 11: 1286-1291.
- [3] Satoh, W., Hosono, H. and Suzuki, H., 2005, On-chip microfluidic transport and mixing using electrowetting and incorporation of sensing functions, *Anal. Chem.* 77: 6857-6863.
- [4] Sassa, F., Fukuda, J. and Suzuki, H., 2008, Microprocessing of liquid plugs for bio/chemical analyses, *Anal. Chem.* 80: 6206-6213.
- [5] Suzuki, H. and Matsugi, Y., 2005, Integrated microfluidic system for the simultaneous determination of ammonia, creatinine, and urea, *Sens. Actuator B* 108: 700-707.
- [6] Huang, C.J., Lin, J.L., Chen, P.H., Syu, M.J. and Lee, G.B., 2011, A multi-functional electrochemical sensing system using microfluidic technology for the detection of urea and creatinine, *Electrophoresis* 32: 931-938.
- [7] Timmer, B.H., van Delft, M., Koelmans, W.W., Olthuis, W. and van den Berg, A., 2006, Selective low concentration ammonia sensing in a microfluidic lab-on-a-chip, *IEEE Sens. J.* 6: 829-835.
- [8] Shen, L., Hagen, J.A. and Papautsky, I., 2012, Point-of-care colorimetric detection with a smartphone, *Lab Chip* 12: 4240-4243.
- [9] Zhu, H., Isikman, S.O., Mudanyali, O., Greenbaum, A. and Ozcan, A., 2013, Optical imaging techniques for point-of-care diagnostics, *Lab Chip* 13: 51-67.

- [10] Mao, X. and Huang, T.J., 2012, Microfluidic diagnostics for the developing world, *Lab Chip* 12: 1412-1426.
- [11] Hruschka, W., Massie, D. and Anderson, J., 1983, Computerized analysis of two-dimensional electrophoretograms, *Anal. Chem.* 55: 2345-2348.
- [12] Rakow, N. and Suslick, K., 2000, A colorimetric sensor array for odour visualization, *Nature* 406: 710-713.
- [13] Duffy, D., Gillis, H., Lin, J., Sheppard, N. and Kellogg, G., 1999, Microfabricated centrifugal microfluidic systems: Characterization and multiple enzymatic assays, *Anal. Chem.* 71: 4669-4678.
- [14] Lai, S., Wang, S., Luo, J., Lee, L., Yang, S. and Madou, M., 2004, Design of a compact disk-like microfluidic platform for enzyme-linked immunosorbent assay, *Anal. Chem.* 76: 1832-1837.
- [15] Potyrailo, R., Morris, W., Leach, A., Sivavec, T., Wisnudel, M. and Boyette, S., 2006, Analog signal acquisition from computer optical disk drives for quantitative chemical sensing, *Anal. Chem.* 78: 5893-5899.
- [16] Lange, S., Roth, G., Wittemann, S., Lacoste, T., Vetter, A., Grassle, J., Kopta, S., Kolleck, M., Breiting, B., Wick, M., Horber, J., Dubel, S. and Bernard, A., 2006, Measuring biomolecular binding events with a compact disc player device, *Angew. Chem. Int. Ed.* 45: 270-273.
- [17] Filippini, D., Svensson, S. and Lundstrom, I., 2003, Computer screen as a programmable light source for visible absorption characterization of (bio)chemical assays, *Chem. Comm.* 2: 240-241.
- [18] Sumriddetchkajorn, S., Chaitavon, K. and Intaravanne, Y., 2013, Mobile device-based self-referencing colorimeter for monitoring chlorine concentration in water, *Sens. Actuators B Chem.* 182: 592-597.
- [19] Hosono, H., Satoh, W., Toya, M., Morimoto, K., Fukuda, J. and Suzuki, H., 2008, A microanalysis system with automatic valve operation, pH regulation, and detection functions, *Sens. Actuators B Chem.* 132: 614-622.
- [20] World Chemical Group, วิธีการใช้คลอรีนที่ถูกต้องและปลอดภัย, แหล่งที่มา : http://www.worldchemical.co.th/articles_show.php, 24 มิถุนายน 2557
- [21] เจต พานิชักดิ์, ฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี, แหล่งที่มา : http://www.worldchemical.co.th/articles_show.php, 17 สิงหาคม 2557
- [22] Young, T., 1805, An essay on the cohesion of fluids, *Trans. Roy. Soc. (London)* 95: 65-87.
- [23] Lippmann, M.G., 1875, Relations entre les phenomenes electriques et capillaries, *Ann. Chim. Phys.* 5: 494-549.
- [24] Satoh, W., Loughran, M. and Suzuki, H., 2004, Microfluidic transport based on direct electrowetting, *J. Appl. Phys.* 96: 835-841.