



Research Article

Use of dielectric property for chemical sensing and measurement**Phurich Keeratcharinpanich^{1,3}, Duangjai Nacapricha^{2,3} and Phoonthawee Saetear^{2,3,*}**¹*Master of Science in Chemistry, Department of Chemistry, Faculty of Science, Mahidol University
Rama 6 Road, Ratchatewi, Bangkok 10400 Thailand*²*Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry, Faculty of Science,
Mahidol University, Rama 6 Road, Ratchatewi, Bangkok 10400 Thailand*³*Flow Innovation-Research for Science and Technology Laboratories (Firstlabs), Thailand***Email: phoonthawee.sae@mahidol.ac.th*

Received <29 June 2023>; Revised <22 July 2023>; Accepted <23 July 2023>

Abstract

The use of dielectric property for chemical sensing and measurement in liquid samples was presented. Binary-liquid mixtures were used to demonstrate the applicability and efficiency of the concept. For a mixture of two liquids with different dielectric constants, a new dielectric property is a combination of the two liquids. Thus, quantitative analysis of a liquid in that mixture can be accomplished if we can detect the change in signal due to the change in dielectric constant of liquid mixtures. This work adopts a capacitively coupled contactless conductivity detector (C4D) to measure chemical components in binary-liquid systems. A C4D sensor is lab-made of polytetrafluoroethylene (PTFE) tubing with two metal electrodes placed on the outer wall of the tubing. Parameters that affect the performance of C4D sensor, such as electrical parameters (frequency and voltage supplied to the electrode), tubing size and various types of metal electrodes were investigated. Measuring solution aspirated through the sensing area of electrode gives the changes in C4D signal from the concentration of interested liquid. In this work, various ratios in a binary-liquid mixture of alcohol and water leads the changes in C4D signal response. Quantitative analysis can be carried out using the plot between the response signals of the C4D with target analyte concentration. Rubbing alcohol is selected as a target sample for demonstrating the C4D response to the dielectric property. In the method validation, our developed C4D method gives no significant differences of the quantitative results from gas chromatography. These sensors can readily measure when liquid contacts the sensing areas. Furthermore, it is convenient to use and solvent resistance. Consequently, the sensors can be applicable as portable devices for quality control in the production line as well as in the laboratory.

Keywords: Contactless conductivity, Impedance, Alcohol, Rubbing alcohol, Binary-liquid mixture

บทความวิจัย

การใช้คุณสมบัติไดอิเล็กทริกในการตอบสนองต่อสารเคมีและการวัดปริมาณ

ภูริช กิริชชินทร์พานิชย์^{1,3} ดวงใจ นาคะปรีชา^{2,3} และ พูนทวี แซ่เตีย^{2,3,*}¹หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ถนนพระราม 6 ราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย²ภาควิชาเคมีและศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ถนนพระราม 6 ราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย³ห้องปฏิบัติการนวัตกรรม-วิจัยการไหลเพื่อวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประเทศไทย

*Email: phoonthawee.sae@mahidol.ac.th

รับบทความ: 29 มิถุนายน 2566 แก้ไขบทความ: 22 กรกฎาคม 2566 ยอมรับตีพิมพ์: 23 กรกฎาคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอการใช้คุณสมบัติไดอิเล็กทริกในการตอบสนองต่อสารเคมีและการวัดปริมาณในตัวอย่างของเหลว โดยได้เลือกของเหลวประเภทสารละลายผสมสองชนิดมาใช้เพื่อสาธิตความสามารถและประสิทธิภาพของหลักการวัด สำหรับสารละลายผสมสองชนิดซึ่งแต่ละองค์ประกอบมีค่าไดอิเล็กทริกที่ต่างกันนั้น ส่งผลให้ค่าไดอิเล็กทริก รวมของระบบเปลี่ยนแปลงไปซึ่งเกิดจากการผลรวมของค่าไดอิเล็กทริกขององค์ประกอบทั้งสอง หากเราสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณตอบสนองใด ๆ อันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงไดอิเล็กทริกได้ เราจะสามารถทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณทางเคมีได้ ในงานนี้ ผู้วิจัยประยุกต์ตัวตรวจวัดการนำไฟฟ้าแบบไม่สัมผัสสารละลาย หรือที่เรียกว่า capacitively coupled contactless conductivity detector (C4D) มาใช้กับการวัดเชิงปริมาณทางเคมีในตัวอย่างสารละลายผสมสองชนิด ผู้วิจัยได้สร้างตัวตรวจวัด C4D ขึ้นใช้เอง ทำด้วยท่อพอลิเอทเธอร์ฟลูออโรเอทิลีน หรือ PTFE ที่ป้ายด้วยหมึกโลหะหรือแถบโลหะบริเวณด้านนอก เพื่อให้บางส่วนนำไฟฟ้าได้และทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดด้านนอกจำนวน 2 อิเล็กโทรด โดยได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของตัวตรวจวัดที่ได้สร้างขึ้นนี้ ได้แก่ ความถี่และศักย์ไฟฟ้าของสัญญาณที่ให้กับอิเล็กโทรด ขนาดของท่อที่ใช้สร้างตัวตรวจวัด C4D และชนิดของโลหะที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรด ตัวตรวจวัด C4D จะให้สัญญาณเปลี่ยนแปลงจากตัวทำละลายเมื่อสารละลายมาตรฐานหรือสารละลายตัวอย่างไหลผ่านบริเวณที่มีอิเล็กโทรด การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนขององค์ประกอบในสารละลายผสมระหว่างแอลกอฮอล์และน้ำ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณตอบสนองจากตัวแปรอิมพีแดนซ์ (Z) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณได้ โดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณตอบสนองของ C4D กับความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายได้ ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ในกลุ่มตัวอย่างแอลกอฮอล์ล้างแผลด้วยตัวตรวจวัด C4D นี้ให้ค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี นอกจากนี้ ตัวตรวจวัด C4D ยังสามารถอ่านผลได้ทันที ใช้งานง่ายและทนต่อสารเคมี จึงเหมาะแก่การพัฒนาเป็นเครื่องมือภาคสนามเพื่องานควบคุมคุณภาพซึ่งสามารถนำไปติดตั้งในโรงงานผลิต รวมถึงการใช้ในการวัดภายในห้องปฏิบัติการได้อีกด้วย

คำสำคัญ: เครื่องตรวจวัดการนำไฟฟ้าแบบไม่สัมผัสสารละลาย, อิมพีแดนซ์, แอลกอฮอล์, แอลกอฮอล์ล้างแผล, สารละลายผสมสองชนิด

บทนำ

คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของสารละลายผสมสองชนิด

คุณสมบัติไดอิเล็กทริกสามารถแสดงในรูปของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ) ซึ่งเป็นค่าคุณลักษณะเฉพาะของสารที่สนใจพิจารณา ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนี้มีอยู่ได้ในทุกวัสดุของสารทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารบางชนิด

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารบางชนิด ณ อุณหภูมิ 25°C

สาร	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ) ¹
เกลือแกง	6.12
น้ำ	78.3
เอทานอล	24.3
ไอโซโพรพานอล	18.3
อากาศ	1

¹CRC Handbook of Chemistry and Physics, 67th Edition

หากพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารที่เป็นของเหลวบริสุทธิ์ จะพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะสัมพันธ์กับความมีขั้วโดยสัมพันธ์ของโมเลกุลของเหลว กล่าวคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนเมื่อความเป็นขั้วของโมเลกุลเพิ่มขึ้น ดังตัวอย่างเช่น ในตารางที่ 1 ความเป็นขั้วของน้ำสูงกว่าตัวทำละลายที่เป็นของเหลวอื่น ๆ ดังนั้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำจึงสูงกว่าตัวทำละลายชนิดอื่นด้วย

หากนำของเหลวบริสุทธิ์ 2 ชนิด มาผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เราจะได้สารละลายใหม่ที่เรียกว่า “สารละลายผสมสองชนิด (binary-liquid mixture)” ซึ่งทำให้ค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายผสมสองชนิดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากค่าไดอิเล็กทริกของของเหลวบริสุทธิ์ (Wang and Anderko, 2001) โดยจะเป็นผลรวมของค่าไดอิเล็กทริกของของเหลวบริสุทธิ์ มีรายงานเกี่ยวกับวิธีการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารละลายผสมสองชนิด (Jayalaxmi *et al.*, 1987; Smith *et al.*, 1998; Sengwa and Sankhla, 2007; Yang *et al.*, 2009; Reynolds and Hough, (1957)) สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น สมการคณิตศาสตร์ของ Lichenecker เป็นสูตรที่ใช้ได้สำหรับการคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารละลายผสมสองชนิด ดังแสดงในสมการที่ 1 (Gonvinda Raju, 1988)

$$\epsilon_m = \exp [V_1 \log \epsilon_1 + V_2 \log \epsilon_2] \quad (1)$$

โดยที่ ϵ_m คือ ค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายผสมสองชนิด

ϵ_1 คือ ค่าไดอิเล็กทริกของของเหลวบริสุทธิ์ชนิดที่ 1

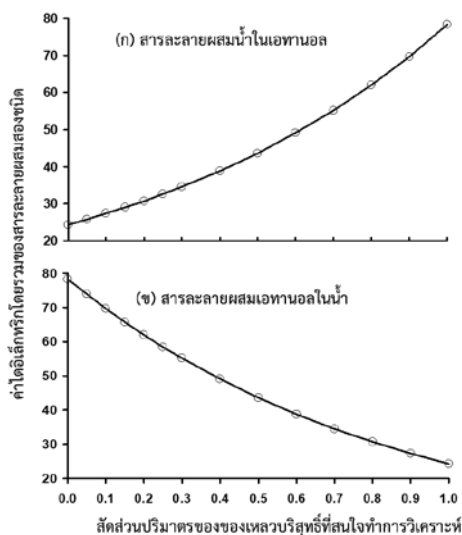
ϵ_2 คือ ค่าไดอิเล็กทริกของของเหลวบริสุทธิ์ชนิดที่ 2

V_1 คือ สัดส่วนปริมาตรของของเหลวบริสุทธิ์ชนิดที่ 1

V_2 คือ สัดส่วนปริมาตรของของเหลวบริสุทธิ์ชนิดที่ 2

ภาพที่ 1 แสดงกราฟจำลองการคำนวณความสัมพันธ์ตามสมการคณิตศาสตร์ของ Lichenecker เราสามารถจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่คำนวณได้ของสารละลายผสมสองชนิด (ϵ_m) และสัดส่วนปริมาตรของน้ำ (V_1) และสัดส่วนปริมาตรของเอทานอล (V_2) พบว่า หากพิจารณาน้ำเป็นสารที่สนใจวิเคราะห์ แนวโน้มของการคำนวณ ϵ_m จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาตรของน้ำ (ภาพที่ 1ก) ถือได้ว่าการเพิ่มปริมาตรน้ำทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำสูงกว่าเอทานอล ทำให้การรวมกันของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม หากพิจารณาเอทานอลเป็นสารที่สนใจวิเคราะห์ ค่า ϵ_m จะลดลง (ภาพที่ 1ข) ซึ่งมาจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเอทานอลมีค่าต่ำกว่าน้ำ ดังนั้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารละลายผสมสองชนิดจึงมีแนวโน้มลดลงนั่นเอง

จากกราฟจำลองในภาพที่ 1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารละลายผสมสองชนิด คือ ผลรวมค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มาจากของเหลวบริสุทธิ์ทั้งสองชนิด ดังนั้น การวิเคราะห์เชิงปริมาณขององค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งที่สนใจในสารละลายผสมสองชนิด จะสามารถทำได้ หากเราสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจากตัวตรวจวัดอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารละลายผสมสองชนิดนั่นเอง

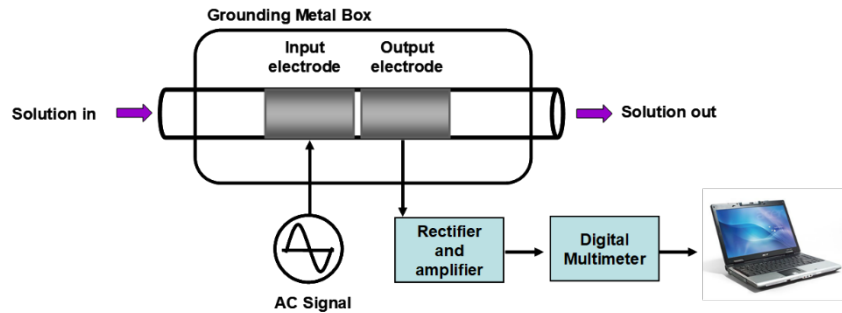


ภาพที่ 1 กราฟแสดงการคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารละลายผสมสองชนิด ซึ่งผสมกันระหว่าง (ก) น้ำ ($\epsilon = 78.3$) และ (ข) เอทานอล ($\epsilon = 24.3$) ซึ่งเป็นของเหลวบริสุทธิ์ที่สนใจพิจารณา โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ Lichenecker ในการคำนวณ กำหนดให้ V_1 เป็นสัดส่วนปริมาตรของน้ำ และ V_2 เป็นสัดส่วนปริมาตรของเอทานอล

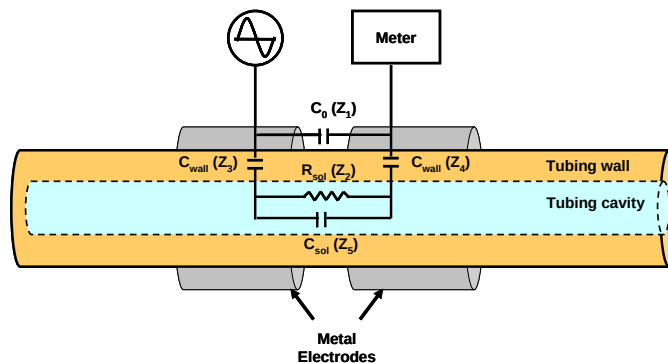
ตัวตรวจวัดการนำไฟฟ้าแบบไม่สัมผัสสารละลาย

ตัวตรวจวัดการนำไฟฟ้าแบบไม่สัมผัสสารละลาย หรือที่เรียกว่า capacitively coupled contactless conductivity detector (C4D) จัดเป็นตัวตรวจวัดประเภทอิมพีแดนซ์เซนเซอร์ (impedance sensor) ที่มีความไวต่ออิมพีแดนซ์ของระบบ โดยได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในเคมีวิเคราะห์ในปี พ.ศ. 2541 (Fracassi Da Silva and Do Lago, 1998; Zemmann *et al.*, 1998) การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารละลายที่ไหลผ่านเครื่องตรวจจับแบบท่อนี้ยังส่งผลให้ตัวตรวจวัด C4D สามารถตรวจจับสัญญาณได้ แผนผังของเครื่องตรวจจับ C4D แสดงในภาพที่ 2 ท่อนวนจะถูกบรรจุในกล่องโลหะสำหรับต่อลงดิน (grounding metal box) และมีแถบการนำไฟฟ้าป้ายอยู่ด้านนอกท่อนวนนี้ แถบการนำไฟฟ้า 1 เรียกว่าอิเล็กโทรดขาเข้า (input electrode) ได้รับความถี่สัญญาณกระแสสลับแบบ sine wave (AC signal) จากเครื่องกำเนิดฟังก์ชัน (function generator) และสัญญาณ C4D ส่งที่ได้ที่โวลต์มิเตอร์แบบดิจิทัล (digital multimeter) จากแถบการนำไฟฟ้า 2 ที่เรียกว่าอิเล็กโทรดขาออก (output electrode) โดยมีการแปลงสัญญาณกระแสไฟฟ้าเป็นศักย์ไฟฟ้า (rectifier) และขยายสัญญาณ (amplifier)

เพื่ออธิบายและทำนายผลลัพธ์ที่สังเกตได้ วงจรไฟฟ้าสมมูล (equivalent electronic circuit) อย่างง่ายซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์ของ C4D ได้ถูกสร้างขึ้นและแก้ไขให้เหมาะสมกับผลการทดลอง ปรากฏการณ์ที่แน่นอนที่เกิดขึ้นในเครื่องตรวจจับ C4D นี้ยังไม่มีรายงานอย่างชัดเจน ซึ่งวงจรสมมูลเหล่านี้จะแตกต่างกันไปตามแต่ละระบบการทดลอง องค์ประกอบทั่วไปที่เหมือนกันในวงจรไฟฟ้าสมมูลประกอบด้วยตัวเก็บประจุ (capacitor) ที่เชื่อมต่อตามลำดับกับตัวต้านทาน (resistor) ดังแสดงในภาพที่ 3 C_{wall} คือความจุไฟฟ้าเนื่องจากผนังของท่อ (wall capacitance) ในขณะที่ R_{sol} แสดงถึงความต้านทานสารละลาย (solution resistance) ซึ่งส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในบริเวณระหว่างแถบการนำไฟฟ้า C_{sol} คือความจุไฟฟ้าของสารละลาย (solution capacitance) ในขณะที่ C_0 คือความจุไฟฟ้าแบบสเตรย์ (stray capacitance)



ภาพที่ 2 แผนผังของตัวตรวจวัดการนำไฟฟ้าแบบไม่สัมผัสสารละลาย (capacitively coupled contactless conductivity detector (C4D))



ภาพที่ 3 วงจรไฟฟ้าสมมูล (equivalent circuit) ของตัวตรวจวัดการนำไฟฟ้าแบบไม่สัมผัสสารละลายแบบ capacitively coupled contactless conductivity detector (C4D)

จากวงจรไฟฟ้าสมมูลในภาพที่ 3 ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2 และ 3 เมื่อ $j = \sqrt{-1}$ และ ω คือ ความถี่เชิงมุม อิมพีแดนซ์รวมสำหรับวงจรอนุกรมและวงจรขนานจะรวมกันในลักษณะเดียวกับตัวต้านทาน (R) ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง (direct current, DC) สมการที่ 4 แสดงการคำนวณอิมพีแดนซ์รวมสำหรับวงจรสมมูลในภาพที่ 3

$$\text{ตัวต้านทาน, } R: \quad Z = R \quad (2)$$

$$\text{ตัวเก็บประจุ, } C \quad Z = -j/(\omega C) \quad (3)$$

$$|Z_{\text{total}}| = \frac{\left[\left(\frac{|Z_1||Z_2|}{|Z_1| + |Z_2|} \right) + |Z_3| + |Z_4| \right] |Z_5|}{\left[\left(\frac{|Z_1||Z_2|}{|Z_1| + |Z_2|} \right) + |Z_3| + |Z_4| \right] + |Z_5|} \quad (4)$$

การพิจารณาวงจรไฟฟ้าสมมูลลักษณะนี้ สามารถประยุกต์เพื่อพิจารณากับตัวตรวจวัด C4D ได้เช่นกัน โดยในงานนี้ ผู้วิจัยพิจารณาความจุไฟฟ้าของสารละลายที่เกี่ยวข้องกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ) ของสารละลายผสมสองชนิด ดังแสดงไว้ในสมการ 5 เมื่อ A คือ พื้นที่ของอิเล็กโทรดที่ขนานกัน และ d คือระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (5)$$

จากที่ได้กล่าวไปข้างต้น ในงานนี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นวิเคราะห์ปริมาณในสารละลายผสมสองชนิดประเภทที่ไม่นำไฟฟ้า (non-electrolyte binary-liquid mixture) ซึ่งความจุไฟฟ้าของสารละลาย (C_{sol}) จะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสัญญาณ C4D ที่แสดงสัญลักษณ์ Z_5 ตามสมการที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของความจุไฟฟ้าของสารละลาย (C_{sol}) นี้จะเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนของ

ของเหลวบริสุทธิ์ที่ผสมกันและทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ) โดยรวมของสารละลายผสมสองชนิดก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน (ตามที่ได้กล่าวไปตามในสมการคณิตศาสตร์ของ Lichenecker และกราฟจำลองในภาพที่ 1) แท้จริงแล้ว ความต้านทานของสารละลาย (R_{sol}) มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าของสารละลาย (C_{sol}) ซึ่งสามารถพิจารณาตัดทิ้งตัวแปรความต้านทานของสารละลายได้ ดังนั้น ระดับความเข้มข้นของของเหลวบริสุทธิ์ที่สนใจวิเคราะห์จะส่งผลต่อสัญญาณ C4D โดยตรง เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของสารละลาย (C_{sol}) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ) โดยรวมของสารละลายผสมสองชนิดเปลี่ยนแปลงนั่นเอง จากรายงานก่อนหน้านี้ การประยุกต์ตัวตรวจวัด C4D ในลักษณะนี้กับสารละลายผสมสองชนิดประเภทที่ไม่นำไฟฟ้า ยังไม่เคยมีรายงานมาก่อน

การประยุกต์ตัวตรวจวัดการนำไฟฟ้าแบบไม่สัมผัสสารละลายสำหรับการวิเคราะห์แอลกอฮอล์ในตัวอย่างแอลกอฮอล์ล้างแผล

ในงานนี้ ผู้วิจัยเลือกตัวอย่างแอลกอฮอล์ล้างแผล ซึ่งจัดเป็นตัวอย่างประเภทสารละลายผสมสองชนิด เพื่อสาธิตการประยุกต์ตัวตรวจวัดการนำไฟฟ้าแบบไม่สัมผัสสารละลาย องค์ประกอบของตัวอย่างแอลกอฮอล์ล้างแผล ประกอบด้วย แอลกอฮอล์ (เอทานอลหรือไอโซโพรพานอล) และ น้ำ โดยความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ดังกล่าวที่เหมาะสมและมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรค เชื้อจุลินทรีย์รวมถึงเชื้อโควิด 19 ต้องอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 60 ถึง 90 โดยปริมาตร (Meyers, (2021) สำหรับประเทศไทย สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) มีข้อกำหนดสำหรับน้ำยาฆ่าเชื้อ ผลิตภัณฑ์แอลกอฮอล์ว่า ห้ามผลิต นำเข้า และจำหน่ายผลิตภัณฑ์แอลกอฮอล์ฆ่าเชื้อที่มีเอทานอล ไอโซโพรพานอล เอ็นโพรพานอล หรือส่วนผสมของแอลกอฮอล์เหล่านี้ต่ำกว่าร้อยละ 70 โดยปริมาตร (The Secretariat of the Cabinet, 2020) ซึ่งมีความสอดคล้องกับเกณฑ์ของประเทศอื่นๆ ดังนั้น เพื่อให้ระดับความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ในตัวอย่างแอลกอฮอล์ล้างแผลเป็นไปตามมาตรฐานในการฆ่าเชื้อโรค การวิเคราะห์เชิงปริมาณของเอทานอล หรือ ไอโซโพรพานอลจึงมีความสำคัญเพื่อการควบคุมคุณภาพ โดยประยุกต์ตัวตรวจวัดการนำไฟฟ้าแบบไม่สัมผัสสารละลายในลักษณะนี้กับกลุ่มตัวอย่างสารละลายแอลกอฮอล์ล้างแผลยังไม่มีเคยมีรายงานมาก่อน

วิธีการดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทดลองสำหรับตัวตรวจวัดการนำไฟฟ้าแบบไม่สัมผัสสารละลายแบบ C4D

1. เครื่องกำเนิดฟังก์ชัน (Instek, Model SFG-2104, USA) ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (AC signal) ในรูปแบบคลื่นฟังก์ชันไซน์ เพื่อใช้จ่ายสัญญาณไปยังอิเล็กทรอนิกส์ขาเข้าบนเครื่อง C4D
2. มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล (Digital Multimeter (DM)) ยี่ห้อ Fluke Digital (Model 8845A, USA) เพื่อใช้ในการวัดสัญญาณจากตัวตรวจวัด C4D
3. เครื่องออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล (รุ่น DS1042C, RIGOL-Technologies, INC., China) ใช้เป็นเครื่องมือวัดความถี่และแรงดันไฟฟ้าทั้งหมดในการทดลองตัวตรวจวัด C4D
4. เครื่องขยายสัญญาณหรือพรีแอมพลิฟายเออร์ (pre-amplifier, Bangkok High Lab Co., Ltd.) ใช้เพื่อขยายและแปลงสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าออสซิลเลชันที่มาจากอิเล็กโทรดขาออก (output electrode) เป็นกระแสตรง

สารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์

สารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ที่ใช้ในงานนี้ คือ สารละลายมาตรฐานเอทานอลในน้ำ และสารละลายมาตรฐานไอโซโพรพานอลในน้ำ โดยเตรียมความเข้มข้นร้อยละ 0 ถึง 100 โดยปริมาตร ทุกความเข้มข้นจะเตรียมเป็นปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร เตรียมจากการผสมสัดส่วนโดยปริมาตรระหว่างน้ำที่ปราศจากไอออนกับแอลกอฮอล์ (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9, Merck, Germany) ยกตัวอย่าง เช่น การเตรียมสารละลายมาตรฐานเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตรนั้น จะเตรียมจากการผสมน้ำปราศจากไอออน 40.00 มิลลิลิตรเข้ากับเอทานอล 10.00 มิลลิลิตร เป็นต้น ผู้วิจัยใช้ปิเปตเป็นอุปกรณ์ในการถ่ายเทปริมาตรสารตามต้องการลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50.00 มิลลิลิตร ซึ่งขวดวัดปริมาตรนี้ใช้เพื่อการผสมสารละลายที่สะดวกง่าย และ ป้องกันการระเหยของแอลกอฮอล์ระหว่างการผสม สารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ที่เตรียมแบบข้างต้นนี้ จะใช้ในการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสัญญาณตอบสนองของหัวตรวจวัด และ ใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อการวิเคราะห์หาปริมาณในตัวอย่างแอลกอฮอล์ล้างแผล

ตัวอย่างแอลกอฮอล์ล้างแผล

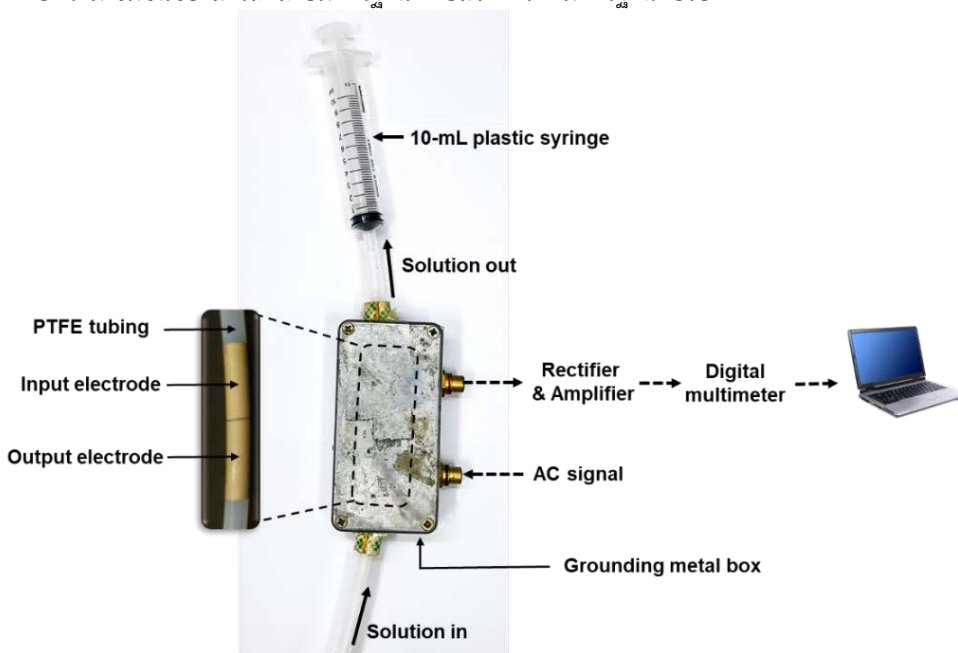
ตัวอย่างสารละลายแอลกอฮอล์ล้างแผล จำนวน 9 ตัวอย่าง โดยเป็นตัวอย่างสารละลายแอลกอฮอล์ล้างแผลที่ผลิตจากเอทานอลจำนวน 4 ตัวอย่าง และ ตัวอย่างสารละลายแอลกอฮอล์ล้างแผลที่ผลิตจากไอโซโพรพานอลจำนวน 5 ตัวอย่าง ตัวอย่าง

ทั้ง 9 ตัวอย่างนี้ ไม่ต้องการการเจือจางตัวอย่าง สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยตรง การทดลองทำซ้ำจำนวน 3 ครั้งต่อตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์หาปริมาณแอลกอฮอล์จากตัวตรวจวัด C4D นี้ ได้ทำการเปรียบเทียบกับเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีที่มีเครื่องตรวจวัดชนิดเฟลม ไอออนไนเซชัน (HP 6890 Series, Hewlett Packard, USA) โดยใช้คอลัมน์ชนิดแคปิลารี (J&W Scientific DB-WAX, Agilent Technologies, USA)

ตัวตรวจวัด C4D และการวัดสัญญาณ C4D จากสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์

ตัวตรวจวัด C4D ที่ใช้ในงานนี้ แสดงในภาพที่ 4 ท่อฉนวน PTFE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.75 มิลลิเมตร ถูกบรรจุในกล่องโลหะสำหรับต่อลงดิน (grounding metal box) ขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร และยาว 10 เซนติเมตร และมีแถบการนำไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรดปายอยู่ด้านนอกท่อฉนวนนี้ อิเล็กโทรดขาเข้าได้รับสัญญาณกระแสสลับแบบ sine wave (AC signal) จากเครื่องกำเนิดฟังก์ชัน (function generator) และสัญญาณ C4D สังเกตได้ที่โวลต์มิเตอร์แบบดิจิตอล (digital multimeter) จากอิเล็กโทรดขาออก โดยมีการแปลงสัญญาณกระแสไฟฟ้าเป็นศักย์ไฟฟ้า (rectifier) และขยายสัญญาณ (amplifier) จากนั้นบันทึกสัญญาณ C4D ด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์และคอมพิวเตอร์

ในการทดลอง ทำการบันทึกสัญญาณ baseline ที่ได้จากอากาศภายในท่อ PTFE จากนั้นจะนำหลอดฉีดยาพลาสติกขนาด 10 มิลลิลิตร สวมเข้ากับปลายท่อ PTFE ด้านสารละลายขาออก (solution out, ภาพที่ 4) จากนั้นจะทำการจุ่มปลายท่อ PTFE ด้านสารละลายขาเข้า (solution in, ภาพที่ 4) ตั้งก้นหลอดฉีดยาพลาสติกเพื่อให้สารละลายมาตรฐาน/สารละลายตัวอย่างไหลเข้ามาในท่อ PTFE โดยไม่ให้อากาศละลายเข้ามาในหลอดฉีดยา เพื่อป้องกันการปนเปื้อนระหว่างสารละลายสัญญาณจากเครื่อง C4D ถูกบันทึกอัตโนมัติตลอดเวลาโดยใช้โปรแกรม Lab VIEW และสัญญาณที่วัดได้จะเป็นความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จากแถบการนำไฟฟ้า output electrode (ในงานนี้เรียกว่า สัญญาณ C4D) โดยพลอตความสูงของสัญญาณ C4D กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานต่อไป



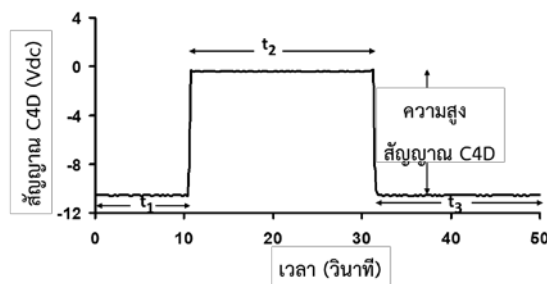
ภาพที่ 4 ส่วนประกอบตัวตรวจวัด C4D และการต่อเข้ากับอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อบันทึกสัญญาณ C4D ที่ได้จากทดลอง

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การทดสอบขั้นเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณในระบบของเหลวผสมสองชนิด

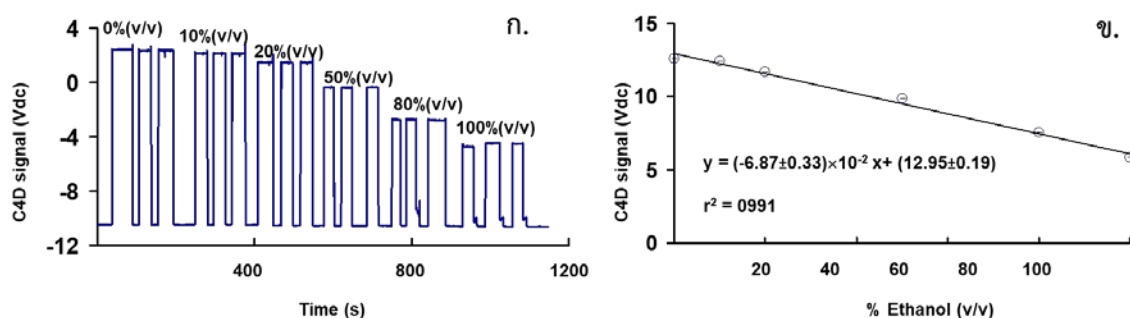
การทดลองตัวตรวจวัด C4D เบื้องต้นได้ใช้น้ำกลั่นปราศจากไอออน ภาพที่ 5 แสดงสัญญาณ C4D ที่วัดได้ ช่วงเวลา t_1 คือ สัญญาณของอากาศ (ท่อเปล่า) ซึ่งใช้เป็นสัญญาณ baseline เมื่อน้ำเปล่าถูกดูดด้วยหลอดฉีดยาพลาสติกและกักไว้ภายในท่อเป็นระยะเวลาหนึ่ง ดังแสดงในช่วงเวลา t_2 สัญญาณ C4D ได้จากในช่วงเวลา t_2 นี้มาจากความแตกต่างของคุณสมบัติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกันระหว่างอากาศ ($\epsilon = 1$) และน้ำกลั่นปราศจากไอออน ($\epsilon = 78.3$) เมื่อได้สัญญาณที่นิ่งระยะหนึ่งจากช่วงเวลา t_2 แล้วจะทำการปล่อยน้ำกลั่นปราศจากไอออนในท่อออก เพื่อให้ได้สัญญาณ baseline กลับมาอีกครั้ง (ช่วงเวลา t_3)

สัญญาณ C4D จะพิจารณาจากผลต่างระหว่างสัญญาณ baseline (ท่อเปล่า) และ สัญญาณของน้ำที่ถูกกักไว้ในท่อ ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 สัญญาณ C4D ของน้ำกลั่นปราศจากไอออน เปรียบเทียบกับสัญญาณ baseline ของอากาศ โดย t_1 และ t_3 คือ สัญญาณจากอากาศ (ท่อเปล่า) และ t_2 คือ สัญญาณจากน้ำกลั่นปราศจากไอออน

จากนั้น ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบตัวตรวจวัด C4D กับสารละลายมาตรฐานเอทานอลความเข้มข้นต่าง ๆ ตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 100 โดยปริมาตร แต่ละความเข้มข้นทำการทดลองซ้ำ จำนวน 3 ซ้ำ ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 6 พบว่าสัญญาณ C4D ของสารละลายเอทานอลทุกความเข้มข้นให้ค่าที่แตกต่างจากสัญญาณ baseline ที่มาจากอากาศ โดยสารละลายเอทานอลร้อยละ 0 โดยปริมาตร (น้ำกลั่นปราศจากไอออน) ให้ค่าสัญญาณ C4D สูงที่สุดจากสารละลายทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ และเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของเอทานอลมากขึ้น พบว่าแนวโน้มสัญญาณ C4D ที่วัดได้นั้นลดลงตามลำดับ (ภาพที่ 6ก) สัญญาณ C4D ที่ลดลงนี้เกิดจากผลรวมค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงจาก ϵ เท่ากับ 78.3 (จากน้ำกลั่นปราศจากไอออน) เป็น ϵ เท่ากับ 24.3 (จากเอทานอลบริสุทธิ์) ดังที่ได้กล่าวไปจากความสัมพันธ์ในภาพที่ 1 และ สมการที่ 1 ถึงแม้ว่าตัวตรวจวัด C4D จะไม่สามารถวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม ตัวตรวจวัด C4D จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกโดยรวมของระบบการวิเคราะห์ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าอธิบายที่ได้กล่าวไว้ในสมการที่ 4 และ 5 เมื่อนำค่าความสูงสัญญาณ C4D มาพลอตเทียบกับความเข้มข้นของเอทานอลที่เตรียมในน้ำ จะได้กราฟมาตรฐานแสดงดังในภาพที่ 6ข โดยค่าความชันของกราฟมาตรฐานนี้มีค่าเป็นลบ เนื่องจากแนวโน้มการลดลงของผลรวมค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารละลายผสมสองชนิดเป็นตัวแปรหลัก จากการทดสอบเบื้องต้นของตัวตรวจวัด C4D บ่งชี้ว่าตัวตรวจวัดนี้ใช้ได้กับการวิเคราะห์เชิงปริมาณในสารละลายผสมของของเหลวผสมแบบสองชนิด

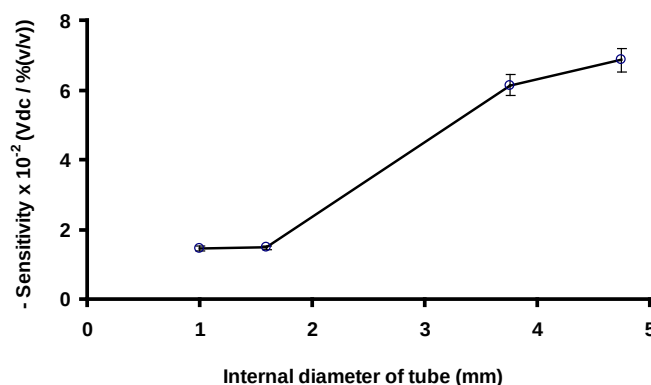


ภาพที่ 6 (ก) สัญญาณ C4D ของสารละลายมาตรฐานเอทานอลร้อยละ 0 ถึง 100 โดยปริมาตร และ (ข) กราฟมาตรฐานของสารละลายเอทานอลในน้ำ

ขนาดท่อพลาสติก PTFE สำหรับการสร้างตัวตรวจวัด C4D

ท่อขนาดที่นำมาทดลองใช้ในการสร้างตัวตรวจวัด C4D มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ PTFE ดังนี้ 1.00, 1.59, 3.76 และ 4.75 มิลลิเมตร จากผลการทดลองในภาพที่ 7 แสดงให้เห็นว่า ความไวในการตอบสนองของตัวตรวจวัด (sensitivity) ในการตอบสนองของสัญญาณเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อขนาดที่ใหญ่ขึ้น อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของปริมาณของสารละลายที่อยู่ในท่อของตัวตรวจวัด C4D มีปริมาณเอทานอลมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของสารละลาย (C_{sol}) (สมการที่ 5) และค่าอิมพีแดนซ์ของ C_{sol} (Z_5 ในสมการที่ 4 และภาพที่ 3) มีค่าสูงขึ้น จึงส่งผลให้สัญญาณ C4D ที่วัดได้สูงขึ้นตามด้วยนั่นเอง อย่างไรก็ตาม การเลือกขนาดของท่อขนาดเพื่อสร้างตัวตรวจวัด C4D นี้ ขึ้นกับความต้องการของผู้ใช้งานว่าต้องการ

ความไวในการตอบสนองของตัวตรวจวัดมากนักน้อยเพียงใด สำหรับในงานนี้ ผู้วิจัยเลือกขนาดท่อฉนวน PTFE ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 4.75 มิลลิเมตร

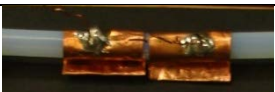


ภาพที่ 7 กราฟแสดงความไวของการวิเคราะห์ของตัวตรวจวัด C4D กับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อขนาดต่าง ๆ ตัวแปรควบคุม: หมึกเงินเป็นวัสดุนำไฟฟ้าที่มีขนาดความยาวอิเล็กโทรด 20 มิลลิเมตร ช่องว่างอิเล็กโทรด 1.0 มิลลิเมตร แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 20 V_{pp} และความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ 100 kHz

ชนิดของแถบโลหะตัวนำไฟฟ้าสำหรับการสร้างอิเล็กโทรด

วัสดุนำไฟฟ้าถูกเคลือบบนท่อด้านนอกสำหรับการผลิตอิเล็กโทรดของตัวตรวจวัด C4D ในงานนี้ ได้เลือกใช้หมึกเงิน แผ่นทองแดง และเทปอลูมิเนียมเพื่อใช้ทดลองเป็นวัสดุนำไฟฟ้า โดยทดสอบด้วยการสร้างกราฟมาตรฐานของเอทานอลในน้ำ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ภาพของวัสดุนำไฟฟ้าและสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐานที่ได้จากวัสดุนำไฟฟ้า 3 ชนิดที่เคลือบด้านนอกของท่อฉนวน PTFE

ชนิดของวัสดุนำไฟฟ้า	ความนำไฟฟ้า ($\times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$)	สมการกราฟมาตรฐาน (0-100%(v/v) ethanol in water)	r^2
 หมึกเงิน	63.0	$y = (-8.34 \pm 0.41) \times 10^{-2} + (14.90 \pm 0.22)$	0.991
 แผ่นทองแดง	59.6	$y = (-7.53 \pm 0.37) \times 10^{-2} + (13.15 \pm 0.20)$	0.991
 เทปอลูมิเนียม	37.8	$y = (-7.02 \pm 0.37) \times 10^{-2} + (12.72 \pm 0.18)$	0.991

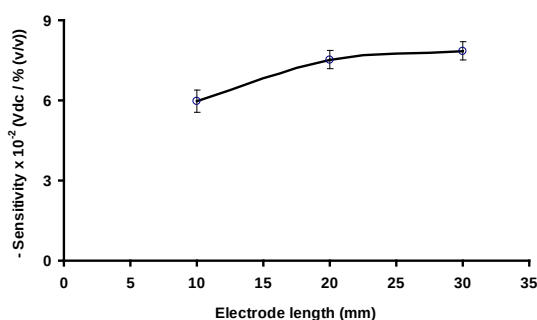
ตัวแปรควบคุมดังต่อไปนี้: เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ PTFE 4.75 มิลลิเมตร, ความยาวอิเล็กโทรด 20 ซม., ช่องว่างอิเล็กโทรด 1.0 มม., ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้า 20 V_{pp} และความถี่กระตุ้น 100 kHz x คือความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรของเอทานอลในน้ำ y คือ สัญญาณ C4D (V_{dc})

ผลการทดลองเป็นไปตามที่คาดไว้ กล่าวคือ หมึกเงินทำหน้าที่เป็นวัสดุนำไฟฟ้าซึ่งให้ความไวในการตอบสนองของตัวตรวจวัด C4D (ตัวแปร A ในสมการที่ 5 พิจารณาจากความชันของกราฟมาตรฐาน) สูงกว่าแผ่นทองแดงและเทปอะลูมิเนียมตามลำดับ จากผลการทดลองมีเหตุผลสองประการในการเลือกหมึกเงินเป็นวัสดุนำไฟฟ้าเพื่อเคลือบด้านนอกของท่อ PTFE ดังนี้ ประการแรก คือ ความไวในการตอบสนองของตัวตรวจวัดสูงกว่าวัสดุนำไฟฟ้าอื่น ๆ เนื่องจากเงินมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด (ตารางที่ 2) และประการที่ 2 คือ หมึกเงินสามารถติดกับท่อได้ง่าย (อิเล็กโทรดเรียงไปกับผิวด้านนอกของท่อฉนวน PTFE) ในขณะที่

การหุ้มแผ่นทองแดงรอบท่อ PTFE นั้น ทำได้ยาก (มีโอกาสที่จะไม่เรียบและมีฟองอากาศด้านใน) และ เทปอลูมิเนียม มีความเสี่ยงสูงต่อการถูกขูดลอก ดังนั้น ในงานนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกหมึกเงินเป็นวัสดุนำไฟฟ้าเพื่อเคลือบด้านนอกของท่อ PTFE

ความยาวของแถบอิเล็กโทรด

ค่าความจุไฟฟ้าของผนังท่อ (C_{wall} ในภาพที่ 3) จะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของแถบอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น สาเหตุมาจากขนาดพื้นที่ของตัวเก็บประจุ (ตัวแปร A ในสมการที่ 5) เพิ่มขึ้น ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 8 โดยจะพบว่าแถบความยาวอิเล็กโทรดที่ 20 และ 30 มิลลิเมตร ให้ความไวในการตอบสนองของตัวตรวจวัดที่ไม่แตกต่างกัน และมากกว่าแถบความยาวอิเล็กโทรดที่ 10 มิลลิเมตร ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้แถบความยาวอิเล็กโทรดที่ 20 มิลลิเมตร เนื่องจากใช้ปริมาณหมึกเงินที่น้อยกว่า



ภาพที่ 8 กราฟแสดงความไวของการวิเคราะห์ของตัวตรวจวัด C4D กับแถบความยาวอิเล็กโทรดขนาดต่าง ๆ ตัวแปรควบคุม: หมึกเงินเป็นวัสดุนำไฟฟ้าบนท่อ PTFE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ PTFE 4.75 มิลลิเมตร ช่องว่างอิเล็กโทรด 1.0 มิลลิเมตร แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 20 V_{pp} และความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ 100 kHz

ช่องว่างระหว่าง 2 อิเล็กโทรด

ในงานนี้ ช่องว่างของอิเล็กโทรด หมายถึง ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดสองอันซึ่งอยู่ที่ด้านนอกของผนังท่อ ซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้เกิดเป็นความจุไฟฟ้าแบบสแตเรีย (C_0 ในภาพที่ 3) ผู้วิจัยทำการศึกษาผลของช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดต่อความไวในการตอบสนองของตัวตรวจวัด ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3 พบว่าความไวในการตอบสนองของตัวตรวจวัดจากช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด 1 และ 3 มิลลิเมตรให้ค่าไม่แตกต่างกัน และความไวในการตอบสนองของตัวตรวจวัดจะลดลงเมื่อเพิ่มระยะช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดเป็น 5 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองอาจสรุปได้ว่า การเพิ่มช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดอาจเพิ่มความจุไฟฟ้าแบบสแตเรีย (C_0) ซึ่งเป็นความจุที่ไม่ต้องการในการทดลอง ความจุไฟฟ้า C_0 นี้สามารถเกิดขึ้นได้เองโดยมาจากอากาศหรือพื้นที่ที่ห่อหุ้มอิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก ซึ่งในการทดลองนี้ไม่สามารถกำจัดออกได้ ดังนั้น ในงานนี้ ผู้วิจัยเลือกช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด 1 มิลลิเมตร เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่เหมาะสม เนื่องจากเป็นการประหยัดการใช้หมึกเงิน (ส่วนที่ตัดออกไปสำหรับช่องว่าง 1 มิลลิเมตร น้อยกว่าส่วนที่ตัดออกไปสำหรับช่องว่าง 3 มิลลิเมตร)

ตารางที่ 3 ผลของช่องว่างระหว่าง 2 อิเล็กโทรดต่อความไวในการตอบสนองของตัวตรวจวัดของสารละลายเอทานอลในน้ำร้อยละ 0 ถึง 100 โดยปริมาตร

ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด (มิลลิเมตร)	สมการกราฟเส้นตรง ^a	r^2
1	$y = [(-7.61 \pm 0.32) \times 10^{-2}]x + (15.81 \pm 0.17)$	0.993
3	$y = [(-7.79 \pm 0.39) \times 10^{-2}]x + (11.98 \pm 0.21)$	0.990
5	$y = [(-6.88 \pm 0.22) \times 10^{-2}]x + (8.08 \pm 0.12)$	0.996
10	$y = [(-5.05 \pm 0.57) \times 10^{-2}]x + (4.91 \pm 0.31)$	0.951

^a ตัวแปรควบคุมของระบบ ท่อ PTFE เคลือบด้วยหมึกเงินเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.75 มิลลิเมตร ความยาวของอิเล็กโทรด 20 มิลลิเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้า 20 V_{pp} และความถี่กระตุ้น 100 kHz; x: ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำ (ร้อยละโดยปริมาตร) และ y: สัญญาณ C4D (V_{dc})

ศักย์ไฟฟ้าของกระแสไฟฟ้าสลับแบบ sine wave ที่จ่ายให้แก่อิเล็กโทรดขาเข้า

เพื่อให้ได้ความไวในการตอบสนองของตัวตรวจวัด C4D ที่สูงสุด ผู้วิจัยได้ทดสอบระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงการแรงดันไฟฟ้าขาเข้าซึ่งเป็นสัญญาณกระแสสลับ (AC) แบบ sine wave ที่สร้างจากเครื่องกำเนิดฟังก์ชัน โดยให้มีค่าแตกต่างกัน ตั้งแต่ 5 ถึง 20 V_{pp} ผลการทดลองที่ได้จากแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่ต่างกันแสดงไว้ในตารางที่ 4 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความไวของตัวตรวจวัด C4D เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ในงานนี้ ผู้วิจัยเลือกแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 20 V_{pp} เนื่องจากให้ความไวของตัวตรวจวัด C4D สูงที่สุด

ตารางที่ 4 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้าต่อความไวในการตอบสนองของตัวตรวจวัดของสารละลายเอทานอลในน้ำร้อยละ 0 ถึง 100 โดยปริมาตร

ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้า (V _{pp})	สมการกราฟเส้นตรง ¹	r ²
5	$y = (-0.87 \pm 0.06) \times 10^{-2} + (1.13 \pm 0.03)$	0.983
10	$y = (-4.35 \pm 0.18) \times 10^{-2} + (6.33 \pm 0.21)$	0.993
15	$y = (-6.07 \pm 0.28) \times 10^{-2} + (11.07 \pm 0.15)$	0.992
20	$y = (-7.56 \pm 0.35) \times 10^{-2} + (14.65 \pm 0.19)$	0.991

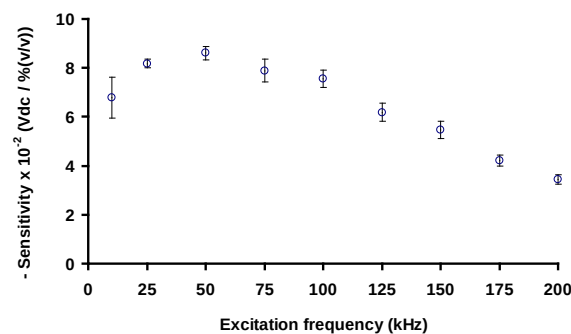
¹ตัวแปรควบคุมของระบบ ท่อ PTFE เคลือบด้วยหมึกเงินเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.75 มิลลิเมตร ความยาวของอิเล็กโทรด 20 มิลลิเมตร และความถี่กระตุ้น 100 kHz; x: ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำ (ร้อยละโดยปริมาตร) และ y: สัญญาณ C4D (V_{dc})

ความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับแบบ sine wave ที่จ่ายให้แก่อิเล็กโทรดขาเข้าที่ 1 (input electrode)

เครื่องกำเนิดฟังก์ชันถูกใช้เพื่อสร้างสัญญาณกระแสสลับในรูปแบบ sine wave ให้กับ input electrode โดยปกติแล้วความถี่ของ sine wave (frequency, f) จะส่งผลต่อสัญญาณ C4D เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์แต่ละค่า (Z₁-Z₅ ในภาพที่ 3) สัมพันธ์กับกับความถี่ดังแสดงในสมการที่ 3 และ 4 อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์เชิงไฟฟ้างกล่าว สามารถเขียนให้อยู่ในสมการดัดแปลง ดังแสดงในสมการที่ 6 ได้สำหรับการพึ่งพาสัญญาณ C4D ตามความถี่โดยใช้แรงดันกระตุ้นคงที่ที่ 20 V_{pp}

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2 \omega^2}}, \quad \omega = 2\pi f \quad (6)$$

ภาพที่ 9 แสดงผลการทดลองศึกษาความถี่ต่อความไวในการวิเคราะห์ของตัวตรวจวัด C4D ความถี่กระตุ้นที่ใช้ทดลองเริ่มตั้งแต่ 10 ถึง 200 kHz สังเกตว่าเมื่อเพิ่มความถี่จาก 10 เป็น 50 kHz ความไวของตัวตรวจวัด C4D จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากนั้นความไวของตัวตรวจวัดจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใช้ความถี่กระตุ้นมากกว่า 50 kHz ซึ่งผลนี้สามารถอธิบายได้โดยใช้สมการ 3 ว่าความถี่แปรผกผันกับอิมพีแดนซ์ของ C ($Z \propto 1/f$) ผู้วิจัยได้เลือกความถี่ 50 kHz เป็นความถี่ที่เหมาะสม เนื่องจากความถี่นี้ให้ความไวสูงสุดและสูงพอที่จะลดความจุไฟฟ้าจากผนังของอิเล็กโทรดที่ผนังท่อ (C_{wall}) นอกจากนี้ ที่ความถี่ 50 kHz ให้ปรากฏการณ์ที่สะท้อนเฉพาะความต้านทาน (R_{sol}) และความจุไฟฟ้า (C_{sol}) ของสารละลายที่กำลังทำการวัด ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดอิมพีแดนซ์ของตัวตรวจวัด C4D



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตอบสนองของตัวตรวจวัด C4D ที่ได้จากความถี่กระตุ้นค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ 10 ถึง 200 kHz

คุณลักษณะการวิเคราะห์ของตัวตรวจวัด C4D สำหรับการวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในตัวอย่างแอลกอฮอล์ล้างแผลจากการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้สรุปสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต่าง ๆ สำหรับตัวตรวจวัด C4D เพื่อวิเคราะห์สารละลายเอทานอลในน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สภาวะตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมสำหรับตัวตรวจวัด C4D เพื่อวิเคราะห์สารละลายเอทานอลในน้ำ

พารามิเตอร์ที่ศึกษา	สภาวะที่เหมาะสม
1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ PTFE	4.75 มิลลิเมตร
2. วัสดุตัวนำไฟฟ้าที่ใช้สร้างแถบอิเล็กโทรด	หมึกเงิน
3. ความยาวของแถบอิเล็กโทรด	20 มิลลิเมตร
4. ช่องว่างระหว่าง 2 แถบอิเล็กโทรด	1 มิลลิเมตร
5. ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้า	20 V _{pp}
6. ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า	50 kHz

ภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 7 เมื่อทดสอบด้วยสารละลายมาตรฐานเอทานอลในน้ำจะได้คุณลักษณะการวิเคราะห์ของตัวตรวจวัด C4D ดังแสดงในตารางที่ 8 ซึ่งครอบคลุมระดับความเข้มข้นของกลุ่มแอลกอฮอล์เป้าหมายที่ต้องการวิเคราะห์ โดยไม่จำเป็นต้องมีการเตรียมตัวอย่างและกำจัดสีของสารละลายตัวอย่างออกก่อนวิเคราะห์

ตารางที่ 8 คุณลักษณะการวิเคราะห์ของตัวตรวจวัด C4D สำหรับวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในตัวอย่างแอลกอฮอล์ล้างแผล

คุณลักษณะ	ค่าของคุณลักษณะ
1. ช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง	EtOH: 10-100%(v/v) i-PrOH: 10-100%(v/v)
2. สมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน	EtOH: $y = -0.0975x - 0.4948$, $r^2 = 0.998$ i-PrOH: $y = -0.1348x - 1.3761$, $r^2 = 0.990$
3. ความเที่ยง (%RSD, n=10)	70% (v/v) EtOH = 0.14% 70% (v/v) i-PrOH = 0.77%
4. Limit of detection (3SD of regression/slope)	EtOH = 1.66%(v/v) i-PrOH = 1.10%(v/v)
5. Limit of quantitation (10SD of regression/slope)	EtOH = 5.54%(v/v) i-PrOH = 3.64%(v/v)

การวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ในตัวอย่างแอลกอฮอล์ล้างแผล

ตัวตรวจวัด C4D ที่พัฒนาขึ้น ได้นำมาทดสอบการใช้งานกับกลุ่มตัวอย่างแอลกอฮอล์ล้างแผลเพื่อวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์เป้าหมาย คือ เอทานอล และไอโพรพานอล โดยได้ทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้กับเทคนิค GC-FID จากผลการทดลองแสดงในตารางที่ 9 จะพบว่าตัวตรวจวัด C4D สามารถตอบสนองต่อองค์ประกอบอื่นในกลุ่มที่ตัวอย่างที่เลือกมาศึกษา สำหรับตัวอย่าง E1 ถึง E3 พบว่าค่าความเข้มข้นเอทานอลที่อ่านได้จากตัวตรวจวัด C4D มีค่าที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับเทคนิค GC-FID และ ค่าที่ระบุไว้ที่ฉลากตัวอย่าง เนื่องจากในตัวอย่าง E1 ถึง E3 มีองค์ประกอบอื่น ๆ นอกเหนือจากน้ำและเอทานอล เช่น อะซิโตน โพรพิลีนไกลคอล และ สารสกัดธรรมชาติ ซึ่งผู้ผลิตได้เติมลงไปเพื่อวัตถุประสงค์บางอย่าง ส่งผลให้สารละลายตัวอย่าง E1 ถึง E3 ไม่จัดเป็นสารละลายผสมสองชนิด ดังที่ได้กล่าวถึงการตอบสนองของตัวตรวจวัดประเภท C4D อาศัยเรื่องความจุไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ ซึ่งจะสามารถตอบสนองต่อองค์ประกอบทั้งหมดในสารละลายที่สนใจจะวิเคราะห์ หรือตอบสนองต่อค่าความจุไฟฟ้าของสารละลาย C_{sol} นั้นเอง

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาตัวอย่าง E4 และ P1 ถึง P5 พบว่า ผลการวิเคราะห์ปริมาณจากตัวตรวจวัด C4D ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับเทคนิค GC-FID อย่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (t -Test: Paired Two Sample for Means; $t_{stat} = 0.246$ และ $t_{critical} = 2.78$)

ตารางที่ 9 ปริมาณแอลกอฮอล์ในสารละลายแอลกอฮอล์ล้างแผล 9 ชนิดจากตัวตรวจวัด C4D และเทคนิค GC-FID

ตัวอย่าง	ปริมาณแอลกอฮอล์ในสารละลายแอลกอฮอล์ (ร้อยละโดยปริมาตร)			องค์ประกอบอื่น ๆ (ร้อยละโดยปริมาตร) ที่ระบุไว้ที่ฉลากตัวอย่าง
	ตัวตรวจวัด C4D	เทคนิค GC-FID	ค่าที่ระบุไว้ที่ฉลากตัวอย่าง	
E1	92.22 ± 0.84	64.21 ± 0.40	70	อะซิโตน (18)
E2	34.95 ± 0.73	73.35 ± 0.37	73.7	โพรพิลีนไกลคอล (1.5)
E3	396.53 ± 0.19	70.26 ± 0.20	70	สารสกัดธรรมชาติ
E4	70.67 ± 0.50	70.54 ± 0.44	70	-
P1	63.42 ± 1.33	63.03 ± 0.33	70	-
P2	62.43 ± 0.17	63.17 ± 1.58	70	-
P3	62.69 ± 0.07	63.89 ± 0.74	70	-
P4	73.31 ± 0.07	69.53 ± 0.28	70	-
P5	64.98 ± 0.13	68.72 ± 0.26	70	-

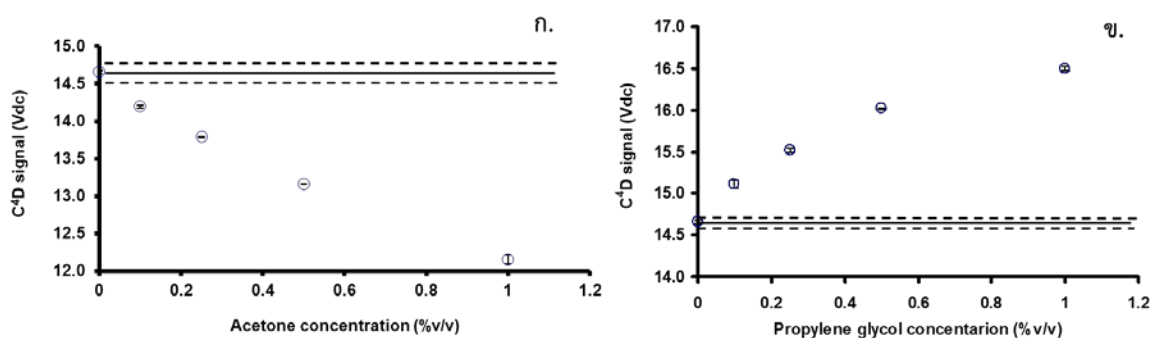
[†] ส่วนประกอบอื่นที่ระบุบนฉลากนอกเหนือจากน้ำและแอลกอฮอล์

รหัสตัวอย่าง 'E' แทนเอทานอลเป็นสารที่วิเคราะห์ในตัวอย่าง และ 'P' แสดงไอโซโพรพานอลเป็นสารวิเคราะห์ในตัวอย่าง

ผลของตัวรบกวนที่ส่งผลต่อสัญญาณ C4D สำหรับวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในตัวอย่างแอลกอฮอล์ล้างแผล

จากผลการทดลองวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์แสดงในตารางที่ 9 สามารถสรุปได้ว่า การเติมสารอื่นที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงพอจะส่งผลการรบกวน เช่น กรณีตัวอย่าง E1 ที่มีอะซิโตนอยู่ถึงร้อยละ 18 โดยปริมาตร ซึ่งอะซิโตนนี้เองมีค่าไดอิเล็กทริก (ϵ) เท่ากับ 20.7 ก็จะรบกวนการวัดสารละลายผสมที่มีองค์ประกอบสองชนิดนี้ได้ และในทำนองเดียวกับกรณีตัวอย่าง E2 ที่ไม่มีสารโพรพิลีนไกลคอล อยู่เพียงร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรเท่านั้น ซึ่งโพรพิลีนไกลคอลเองมีค่าไดอิเล็กทริก (ϵ) เท่ากับ 30.2 ก็จะรบกวนการวัดสารละลายผสมที่มีองค์ประกอบสองชนิดนี้ได้เช่นกัน

เพื่อเป็นการยืนยันสมมติฐานข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ทดสอบผลการรบกวนของอะซิโตนและโพรพิลีนไกลคอลต่อสัญญาณ C4D สารละลายมาตรฐานเอทานอลในน้ำที่ร้อยละ 70 โดยปริมาตร จากผลการทดลองแสดงในภาพที่ 10 แสดงให้เห็นว่าตัวตรวจวัดประเภท C4D ที่อาศัยหลักการของอิมพีแดนซ์ เหมาะแก่การประยุกต์กับสารละลายผสมสองชนิดที่ทราบองค์ประกอบแน่นอนและปราศจากการรบกวนจากองค์ประกอบอื่น ๆ



ภาพที่ 10 ผลของการรบกวนของ (ก) อะซิโตน และ (ข) โพรพิลีนไกลคอลต่อสัญญาณ C4D ของสารละลายมาตรฐาน เอทานอลในน้ำที่ร้อยละ 70 โดยปริมาตร หมายถึง: เส้นทึบแสดงค่าเฉลี่ยสัญญาณ C4D ของสารละลายมาตรฐาน เอทานอลในน้ำที่ร้อยละ 70 โดยปริมาตร และ เส้นประแสดงขีดจำกัดการหนได้ ($\pm 3SD$ ของสัญญาณเฉลี่ยของสารละลายมาตรฐาน) ต่อการรบกวนจาก (ก) อะซิโตน และ (ข) โพรพิลีนไกลคอล ของตัวตรวจวัด C4D

สรุปผลการทดลอง

ในงานนี้ ผู้วิจัยเสนอประยุกต์ตัวตรวจวัดการนำไฟฟ้าแบบไม่สัมผัสสารละลาย หรือที่เรียกว่า capacitively coupled contactless conductivity detector (C4D) มาใช้กับการวัดเชิงปริมาณทางเคมีในตัวอย่างสารละลายผสมสองชนิด โดยอาศัยคุณสมบัติไดอิเล็กทริกในการตอบสนองต่อสารเคมีและการวัดปริมาณในตัวอย่างของเหลว โดยได้เลือกของเหลวประเภท

สารละลายผสมสองชนิดมาใช้เพื่อสาธิตความสามารถและประสิทธิภาพของหลักการวัด สารละลายผสมสองชนิดซึ่งแต่ละองค์ประกอบมีค่าไดอิเล็กทริกที่ต่างกันนั้น ส่งผลให้ค่าไดอิเล็กทริกรวมของระบบเปลี่ยนแปลงไปซึ่งเกิดจากการผลรวมของค่าไดอิเล็กทริกขององค์ประกอบทั้งสอง ตัวตรวจวัด C4D สามารถนำมาใช้กับการวัดเชิงปริมาณทางเคมีในตัวอย่างสารละลายผสมสองชนิดที่ทราบองค์ประกอบแน่นอน ซึ่งในงานนี้ได้เลือกใช้สารละลายตัวอย่างแอลกอฮอล์ล้างแผลที่ประกอบไปด้วยเอทานอล/ไอโซโพรพานอล และ น้ำเท่านั้น นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้เลือกกลุ่มตัวอย่างที่มีองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น อะซิโตน โพรพิลีนไกลคอล และสารสกัดธรรมชาติ เพื่อแสดงให้เห็นว่าตัวตรวจวัด C4D นี้เหมาะแก่การใช้งานกับสารละลายผสมสองชนิดเท่านั้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณตอบสนองจากตัวแปรอิมพีแดนซ์ (Z) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณได้โดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณตอบสนองของ C4D กับความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายได้ ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ในกลุ่มตัวอย่างแอลกอฮอล์ล้างแผลด้วยตัวตรวจวัด C4D นี้ให้ค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี นอกจากนี้ ตัวตรวจวัด C4D ยังสามารถอ่านผลได้ทันที ใช้งานง่ายและทนต่อสารเคมี จึงเหมาะแก่การพัฒนาเป็นเครื่องมือภาคสนามเพื่องานควบคุมคุณภาพซึ่งสามารถนำไปติดตั้งในโรงงานผลิต รวมถึงการใช้ในการวัดภายในห้องปฏิบัติการได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนการศึกษาจากทุนเสริมสร้างนักวิทยาศาสตร์รุ่นใหม่ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี (PERCH-CIC) กระทรวงอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

References

- The Secretariat of the Cabinet. (2020). Notification of the Ministry of Public Health. Retrieved 22 July 2023, from **Ratchakitcha**: <https://ratchakitcha.soc.go.th/documents/17123828.pdf>
- Fracassi Da Silva, J. A. and Do Lago, C. L. (1998). An Oscillometric Detector for Capillary Electrophoresis. **Analytical Chemistry**, 70(20), 4339-4343.
- Govinda Raju, G. R. (1988). In Dielectric constant of binary mixtures of liquids, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. **Annual Report., Conference on, 1988**, 357-363.
- Reynolds, J. A. and Hough, J. M. (1957) Formulae for Dielectric Constant of Mixtures. **Proceeding of the Physical Society Section B**, 70, 769-774.
- Jayalaxmi, Y., Guha, S., Vani, V. C. and Gopal. E. S. R. (1987). The dielectric constant of the binary liquid system n heptane + methanol near its critical temperature. **Pramana**, 28(3), 269-275.
- Meyers, C. (2021). Ethanol and isopropanol inactivation of human coronavirus on hard surfaces. **Journal of Hospital Infection**, 107, 45-49.
- Sengwa, R. J. and Sankhla, S. (2007). Dielectric properties of binary and ternary mixtures of alcohols: Analysis of H-bonded interaction in complex systems. **Journal of Non-Crystalline Solids**, 353(47-51), 4570-4574.
- Smith, R. L., Lee, S. B., Komori, H. and Arai, K. (1998). Relative permittivity and dielectric relaxation in aqueous alcohol solutions. **Fluid Phase Equilibria**, 144(1-2), 315-322.
- Wang, P. and Anderko, A. (2001) Computation of dielectric constants of solvent mixtures and electrolyte solutions. **Fluid Phase Equilibria**, 186(1-2), 103-122.
- Yang, L. J., Yang, X. Q., Huang, K. M., Jia, G. Z. and Shuang, H. (2009). Dielectric Properties of Binary Solvent Mixtures of Dimethyl Sulfoxide with Water. **International Journal of Molecular Sciences**, 10(3), 1261-1270.
- Zemann, A. J., Schnell, E., Volgger, D., and Bonn, G. K. (1998). Contactless Conductivity Detection for Capillary Electrophoresis. **Analytical Chemistry**, 70(3), 563-567.