



การศึกษาผลของขนาด รูปร่างและตำแหน่งของน้ำ ต่อค่าความจุไฟฟ้าด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้คอมโซล มัลติฟิสิกส์ The Effect of Size, Shape, and Position of Water on Capacitance by Finite Element Simulation using COMSOL Multiphysics

สุธารัตน์ รัตน์¹, ธรรมรงค์ เอียดคง¹, กิตติพิชฌ์ มีสวาสดี² และ สรศักดิ์ ด่านวรพงค์^{1*}

Sutharat Rattana¹, Thammarong Eadkhong¹, Kittipitch Meesawat² and Sorasak Danworaphong^{1*}

¹ สาขาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

² สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

¹ Physics major, School of Science, Walailak University

² Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

Received : 22 April 2022

Revised : 16 September 2022

Accepted : 12 October 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากน้ำที่มีขนาด รูปร่างและตำแหน่งระหว่างแผ่นตัวนำที่แตกต่างกันด้วยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ COMSOL Multiphysics ระบบวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยแผ่นตัวนำคู่ขนานที่ถูกจำลองขึ้น กำหนดให้แผ่นทองแดงขนาด $20 \times 20 \text{ cm}^2$ วางขนานห่างกัน 20 cm โปรแกรมจำลองถูกสอบทานโดยใช้อากาศและน้ำเป็นตัวอย่ง ผลของการสอบทานพบว่าค่าไดอิเล็กทริกของน้ำและอากาศที่อุณหภูมิห้องมีค่าสอดคล้องกับค่าจริง คือ 78.9 และ 1.00063 ตามลำดับ ระบบจำลองถูกใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากตำแหน่งวัสดุแวดล้อมพบว่าวัสดุแวดล้อมไม่มีผลกระทบต่อระบบวัดอยู่ห่างจากวัสดุแวดล้อมโดยรอบอย่างน้อย 30 cm ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปริมาตรของวัสดุไดอิเล็กทริก (Volume ratio) พบว่าเมื่ออัตราส่วนปริมาตรเท่ากับ 0.05 ความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป 3.32 เปอรเซ็นต์ ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปริมาตร 0.01 การทดสอบผลกระทบที่เกิดจากรูปร่างของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ต่างกัน 5 รูปทรงแต่มีปริมาตรเท่ากันประกอบด้วย ทรงลูกบาศก์ ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก ทรงกระบอก ทรงกลม และทรงรี พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ต่างกันไม่เกิน 6.11 เปอรเซ็นต์ โดยรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากให้ค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด และทรงรีให้ค่าความจุไฟฟ้าน้อยที่สุด สังเกตพบว่ากรณีวัสดุที่มีรูปทรงที่ใกล้เคียงกันจะมีค่าความจุไฟฟ้าต่างกันประมาณไม่เกิน 3 เปอรเซ็นต์ นอกจากนี้ผลการจำลองเมื่อวางวัสดุไว้ที่ตำแหน่งต่างกัน พบว่าเมื่อวางวัสดุใกล้แผ่นตัวนำทั้งสองจะมีค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุดและลดลงเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ความแตกต่างมีค่าไม่เกิน 3.09 เปอรเซ็นต์ และยังพบว่าเมื่อวางวัสดุไว้ที่บริเวณแนวกึ่งกลางของแผ่นคู่ขนานจะได้ค่าความจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันไม่มาก

คำสำคัญ : การจำลอง ; แผ่นตัวนำคู่ขนาน ; ความจุไฟฟ้า



Abstract

This research studies the capacitance variations resulting from water of different sizes, shapes, and positions between conductor plates via simulations using COMSOL Multiphysics. The simulated system includes two $20 \times 20 \text{ cm}^2$ copper plates parallelly placed 20 cm apart. The simulation is verified using air and water as insertions. The results show that the dielectric constant of water and air, 78.9 and 1.00063, agrees with the literature. The capacitance changes due to the location of the surrounding objects become negligible when they are at least 30 cm away from the parallel plates. When the ratio of the dielectric material volume to total volume equals 0.05, a volume ratio variation of 0.01 causes 3.32% in the capacitance changes. A dielectric material of five shapes, i. e. , cube, cuboid, cylinder, sphere, and ellipsoid, having an identical volume, has a capacitance variation no greater than 6.11%. The cuboid object gives the greatest capacitance, while the ellipsoid yields the smallest. Objects of a similar geometrical nature have a less than 3% capacitance difference. The capacitance displays greater values when the material gets closer to either plate. The value decreases as it moves farther from the plate; however, the deviation is less than 3.09%. Moreover, if the material is placed around the center of the parallel plate, the capacitance is insignificantly altered.

Keywords : simulation ; parallel plate ; capacitance

บทนำ

การวัดค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุด้วยแผ่นตัวนำคู่ขนาน เป็นวิธีตรวจสอบวัสดุในรูปค่าความจุไฟฟ้า ชุดเครื่องมือวัดประกอบด้วยแผ่นตัวนำต่างศักย์ 2 แผ่นวางขนานกัน ทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนาน เมื่อนำวัสดุที่มีสมบัติไดอิเล็กทริกวางระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง สนามไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้ประจุไฟฟ้าหรือไอออน ที่อยู่ภายในวัสดุแยกออกจากกันเพียงเล็กน้อย หรือเรียกว่า การโพลาริเซชันทางไฟฟ้า (Thongbai, 2013) ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้มีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นตัวนำคู่ขนานโดยตรง และเนื่องจากวัสดุที่แตกต่างกันจะมีสมบัติไดอิเล็กทริกต่างกัน ทำให้เกิดการโพลาริเซชันทางไฟฟ้าต่างกัน ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าต่างกันไปด้วย จึงมีการนำวิธีนี้มาใช้ในการวัดแบบไม่ทำลาย ซึ่งใช้งานง่าย มีความสะดวก รวดเร็ว มีราคาถูกและมีความแม่นยำสูง (Khaled *et al.*, 2015) เป็นวิธีที่นิยมสำหรับการนำมาตรวจสอบคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตร ตัวอย่างเช่น การวัดระดับความสุกของกล้วย (Soltani *et al.*, 2010, 2011) และมะละกอ (Bhosale & Sundaram, 2015) การวัดความหวานของอ้อย (Naderi-Boldaji *et al.*, 2015) และผลไม้ประเภทส้ม (Bhosale, 2017) การวัดปริมาณน้ำของใบไม้ (Afzal *et al.*, 2010) การตรวจสอบความเข้มข้นของน้ำยางพารา (Chaiwarakorn *et al.*, 2016) การวัดค่าไดอิเล็กทริกของฟิล์มบาง (Yadav *et al.*, 2010) และการใช้เซนเซอร์ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบการเจือปนของน้ำในน้ำผึ้ง (Nuan-On *et al.*, 2015)

แม้จะมีการนำตัวเก็บประจุแบบแผ่นตัวนำคู่ขนานมาใช้ในการวัดสมบัติของวัสดุเป็นจำนวนมาก แต่ผลการศึกษาเท่าที่สืบค้นได้มุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าจากสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกันเป็นหลัก ยังขาดการศึกษาถึงความแปรปรวนของค่าความจุไฟฟ้าอันเนื่องมาจากตำแหน่งและรูปทรงของวัสดุที่นำมาใช้ทดสอบ แต่เนื่องจากการควบคุมรูปทรงและตำแหน่งของวัสดุระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนานโดยไม่ให้รบกวนสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองนั้นเป็นเรื่องยาก การจำลองปรากฏการณ์นี้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง การจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นกระบวนการที่ทนายปริมาณต่าง ๆ ที่เราสนใจด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของสมการทางฟิสิกส์ แบบจำลองจึงมีบทบาทสำคัญในงานของนักวิทยาศาสตร์ ทำให้นักวิทยาศาสตร์สามารถสร้างแบบจำลองขึ้นมาเพื่ออธิบายหรือ/และทำนายปรากฏการณ์ธรรมชาติที่มีความซับซ้อนได้ (Osborne, 2014; Windschitl & Thompson, 2006; Oh & Oh, 2011; Praisri *et al.*, 2022) ผู้ใช้งานสามารถทดสอบแบบจำลองได้ด้วยการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของแบบจำลองอย่างง่าย (Simple model) การจำลองระบบมีข้อดีสามารถควบคุมการทดลองให้อยู่ในสภาพแวดล้อมในอุดมคติ ไม่ถูกรบกวนด้วยความไม่เป็นอุดมคติของวัสดุ อุปกรณ์หรือเครื่องมือวัด เหมาะสำหรับการใช้ทดสอบระบบก่อนการสร้างเครื่องมือนำจริง

เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบหลักของผักและผลไม้ งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาผลของรูปร่างและตำแหน่งของมวลน้ำต่อค่าความจุไฟฟ้าของระบบการวัดด้วยแผ่นตัวนำคู่ขนานโดยการจำลองระบบฟิสิกส์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ซึ่งสามารถมองเห็นกลไกเชิงฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นอย่างเสมือนจริงและครอบคลุมขอบเขตการศึกษาได้เป็นอย่างดี จำลองภายใต้สภาวะศักย์ไฟฟ้าคงที่เนื่องจากไม่ต้องการให้เกิดความร้อนอันเนื่องมาจากความถี่และส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าระบบ การจำลองคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการแก้สมการของแมกซ์เวลล์แบบไม่ขึ้นกับเวลา ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้ประเมินขอบเขตความแปรปรวนของเครื่องมือวัดอันเนื่องจากรูปร่างและตำแหน่งของวัสดุ มีส่วนช่วยให้ผลการวัดสมบัติวัสดุด้วยค่าความจุไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

การจำลองระบบการวัดแบบแผ่นตัวนำคู่ขนานด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.3 ภายใต้โมดูล AC/DC (COMSOL Incorporated, 2017) ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการสอบเทียบระบบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของการวัดด้วยแผ่นคู่ขนาน โดยการจำลองระบบที่มีอากาศและน้ำเป็นตัวกลางแล้วพิจารณาว่าไดอิเล็กทริกที่คำนวณได้จากค่าความจุไฟฟ้าของระบบ และตรวจสอบผลกระทบของวัสดุไดอิเล็กทริกภายนอกต่อระบบ ขั้นตอนที่ 2 เป็นการจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำรูปทรงลูกบาศก์ที่มีปริมาตรต่างกัน ขั้นตอนที่ 3 เป็นการจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบของน้ำที่มีรูปทรงต่างกัน และขั้นตอนที่ 4 เป็นการจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบของตำแหน่งการวางวัสดุไดอิเล็กทริกในระบบต่อค่าความจุไฟฟ้า การจำลองทั้งหมดกำหนดให้ขนาดตาข่าย (Mesh) ของระบบมีค่าไม่เกิน 0.0130 cm คุณสมบัติของระบบ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ และระบบไม่ได้รับการรบกวนของสภาวะแวดล้อม

1. การสอบเทียบแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองกำหนดให้แผ่นทองแดงทั้งคู่มีขนาด 20 x 20 cm² หนา 0.15 cm ติดบนแผ่นอะคริลิกขนาด 30 x 30 cm² หนา 0.5 cm วางแผ่นทองแดงห่างกัน 20 cm และความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนานที่ใช้มีค่า 1 โวลต์ กำหนดให้ตัวกลางเป็นอากาศที่มีค่าไดอิเล็กทริก 1.00059 (Zeng *et al.*, 2017) ดัง Figure 1 ขนาดที่เลือกใช้เหมาะกับการจัดสร้างเพื่อทำการทดลองจริงกับผลไม้ที่สนใจได้กว้างขวางนอกเหนือไปจากผลไม้ที่มีขนาดใหญ่หรือเล็กเป็นพิเศษ เช่น มะพร้าว แก้วมังกร แดงไทย พักทอง ฯลฯ

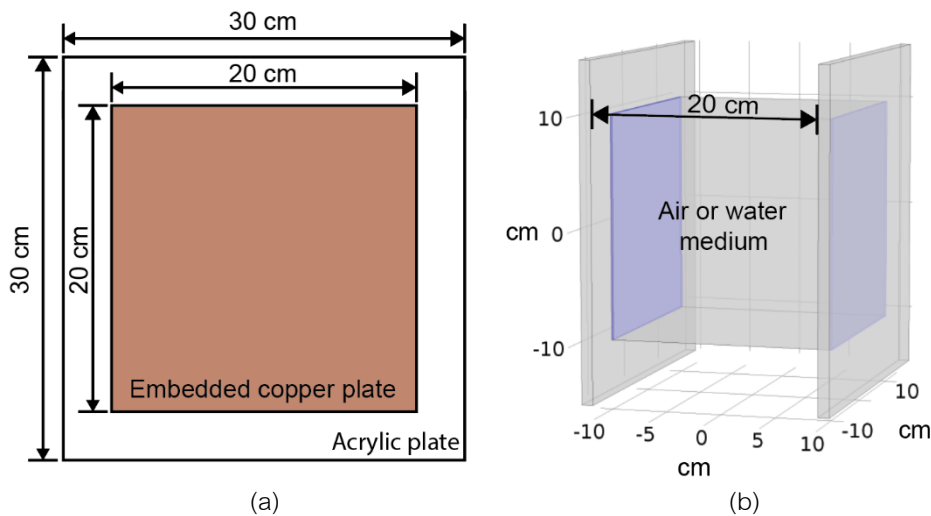


Figure 1 Parallel-plate model used for simulation (a) conductor plate (copper) attached to acrylic housing (b) parallel-plate geometry constructed within COMSOL.

สนามไฟฟ้า (\vec{E}) ที่เกิดขึ้นภายในแผ่นตัวนำเมื่อมีอากาศเป็นตัวกลาง มีขนาดและทิศทางสม่ำเสมอตามสมการ

$$|\vec{E}| = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{Q}{\epsilon A} \quad (1)$$

เมื่อ Q คือ ประจุที่สะสมบนแผ่นตัวนำแต่ละแผ่น ϵ คือ สภาพยอมของวัสดุ A คือ ขนาดของแผ่นตัวนำ σ คือ ความหนาแน่นประจุที่ผิว (Surface charge density) และมีความสัมพันธ์กับศักย์ไฟฟ้าตามสมการ

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (2)$$

เมื่อ V คือ ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนาน และในกรณีที่ตัวกลางเป็นไดอิเล็กทริกเชิงเส้น การกระจายตัวของประจุ (Electric displacement หรือ \vec{D}) ถูกนำมาใช้เพื่อแสดงค่าโพลาไรเซชันไฟฟ้า (Electrical polarization หรือ \vec{P}) ในเทอมสนามไฟฟ้าดังนี้

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \epsilon \vec{E} \quad (3)$$

โดยที่ $\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi_e)$ χ_e คือ ความอ่อนไหวทางไฟฟ้า (Electric susceptibility) และ $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0$ เนื่องจากไม่มีประจุอิสระ (Free charge) อยู่ในระบบที่พิจารณา ขณะที่ประจุผูกมัด (Bound charge) ที่ถูกกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าภายในแผ่นคู่ขนานถูกควมรวมอยู่ในค่าโพลาไรเซชันไฟฟ้าแล้ว

ความสามารถในการเก็บประจุของแผ่นตัวนำคู่ขนาน เขียนได้ดังสมการ

$$C = k \frac{Q}{V} \quad (4)$$

เมื่อ k คือ ค่าไดอิเล็กทริก หรือ ϵ/ϵ_0 โดยที่ ϵ_0 คือ สภาพยอมของสุญญากาศ (8.854 pF/m) โดยการจำลองจะทำการแก้สมการลาปลาซ (Laplace's equation) เพื่อหาศักย์ไฟฟ้า โดยกระบวนการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และนำไปหาสนามไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้า ตามสมการที่ (2) (3) และ (4) ตามลำดับ

การจำลองระบบตาม Figure 1 โดยกำหนดให้ตัวกลาง คืออากาศและน้ำ เนื่องจากอากาศและน้ำเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีค่าไดอิเล็กทริกคงที่ที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ค่าความจุไฟฟ้าจากโปรแกรมจะถูกนำมาคำนวณค่าไดอิเล็กทริกของอากาศและน้ำในระบบภายใต้ความต่อเนื่องของศักย์ไฟฟ้าและการกระจายตัวของประจุที่รอยต่อระหว่างตัวกลาง และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมซึ่งสามารถใช้ระบุความแม่นยำของระบบที่จำลองขึ้นได้ นอกจากนี้ เรายังพิจารณาเงื่อนไขที่ทำให้วัสดุภายนอกไม่รบกวนต่อระบบวัด โดยการจำลองน้ำรูปทรงกลมรัศมี 7 cm เป็นตัวรบกวนวางอยู่ติดกับขอบเขตการวัดภายนอก จุดศูนย์กลางของมวลน้ำอยู่ในแนวเดียวกันกับจุดกึ่งกลางระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนาน 2 แผ่น ตำแหน่งเริ่มต้นของการวัดคือตำแหน่งที่พื้นผิวของมวลน้ำสัมผัสกับพื้นผิวของลูกบาศก์สมมุติที่เกิดขึ้นจากแผ่นตัวนำคู่ขนาน 2 แผ่น วัดค่าความจุไฟฟ้าของระบบเทียบกับระบบที่ไม่ถูกรบกวน จากนั้นเพิ่มระยะของตัวรบกวนให้ห่างจากระบบการวัดครั้งละ 5 cm จนถึง 60 cm กำหนดให้วัสดุไดอิเล็กทริกของระบบคืออากาศดัง Figure 2

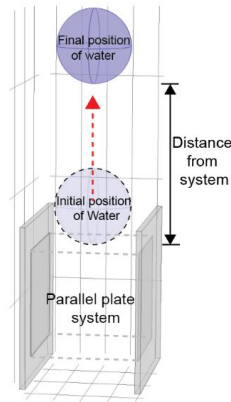


Figure 2 Mass of spherically shaped water located outside the system.

2. การศึกษาผลกระทบบของขนาดที่ต่างกันของน้ำ

การจำลองนี้ใช้ปริมาตรหลักเป็นรูปทรงลูกบาศก์ที่มีความยาวด้านละ 7.34 cm หรือประมาณ 1 ใน 3 ของระยะระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนาน คิดเป็นปริมาตร 5 เพอร์เซ็นต์ของพื้นที่ว่างระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนานทั้งหมด เพื่อศึกษาผลของขนาดที่ต่างกันของวัสดุทดสอบภายในระบบ เราพิจารณาใช้น้ำทรงลูกบาศก์ที่มีปริมาตรครอบคลุมปริมาตรหลักที่สนใจคือตั้งแต่ 0 ถึง 10 เพอร์เซ็นต์ เปลี่ยนแปลงปริมาตรขึ้นละ 1 เพอร์เซ็นต์ จากนั้นสังเกตค่าความจุไฟฟ้าที่ได้

3. การศึกษาผลกระทบบของรูปทรงน้ำ

การศึกษาค่าผลกระทบบของรูปทรงน้ำต่อค่าความจุไฟฟ้าประกอบด้วย ทรงลูกบาศก์ ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก ทรงกระบอก ทรงกลม และทรงรี (Eccentricity = 0.6) ที่มีปริมาตรเท่ากันคือ 400 cm³ คิดเป็น 5 เพอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมด ถูกรวบรวมไว้ที่จุดกึ่งกลางของระบบวัด (0,0,0) ดัง Figure 3(a)-(j)

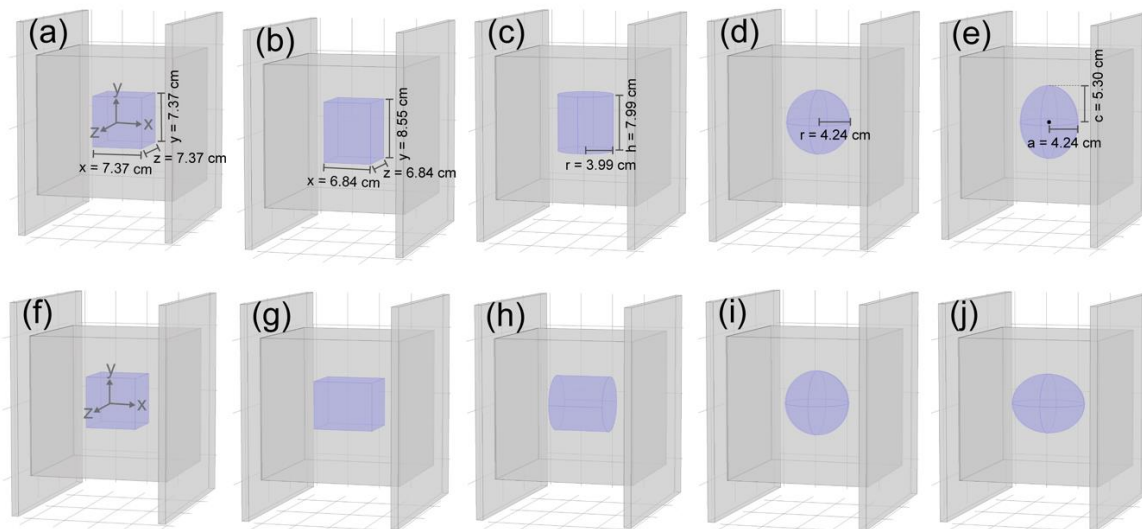


Figure 3 Water of an identical volume but different geometries, (a)-(e), located at the center of the parallel plate system. (f)-(j) present the same water volume as those of (a)-(e) but rotated 90° clockwise about the z-axis.

นอกจากนี้ยังพิจารณารูปทรงน้ำที่มีผิวด้านข้างขนานกับแผ่นตัวนำโดยการปรับค่าพื้นที่หน้าตัดของปริมาตรน้ำ ภายใต้ปริมาตรที่เท่ากัน (5 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรระบบ) ของรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากและรูปทรงกระบอกที่แตกต่างกัน 5 ขนาดดัง Figure 4 (a)-(j)

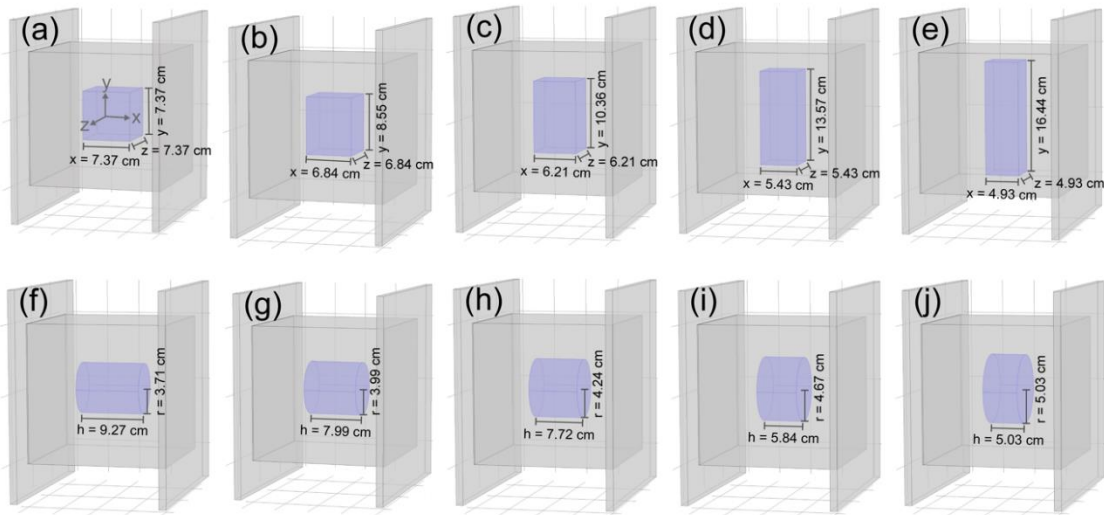


Figure 4 Water of an identical volume of two geometries, i.e., rectangular (a)-(e) and cylindrical (f)-(j) shapes, placed in the center between the parallel-plate system.

4. การศึกษาผลกระทบของตำแหน่งน้ำ

การศึกษามวลของตำแหน่งการวางวัสดุทดสอบในระบบวัดต่อค่าความจุไฟฟ้า โดยใช้น้ำรูปทรงรีแนวตั้งที่มีปริมาตร 80 240 และ 400 cm^3 คิดเป็น 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมดตามลำดับ วางในตำแหน่ง (-5,-5,-5) จนถึง ตำแหน่ง (5,5,5) เปลี่ยนตำแหน่งครั้งละ 2.5 cm รวมทั้งสิ้น 125 ตำแหน่ง แล้วพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละตำแหน่ง เลือกใช้รูปทรงรีแนวตั้งเนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีสัดส่วนใกล้เคียงกับผลไม้มากที่สุด และในปริมาตรที่เท่ากัน รูปทรงรีแนวตั้งจะมีรัศมีด้านสั้นน้อยกว่าความกว้างของลูกบาศก์ ทำให้มีขอบเขตการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกน x ที่กว้างกว่าลูกบาศก์ กำหนดตำแหน่งของแผ่นตัวนำให้อยู่บนระนาบ yz ที่ตำแหน่ง x เท่ากับ -10 และ +10 ตามลำดับ ดัง Figure 5(a)-(c)

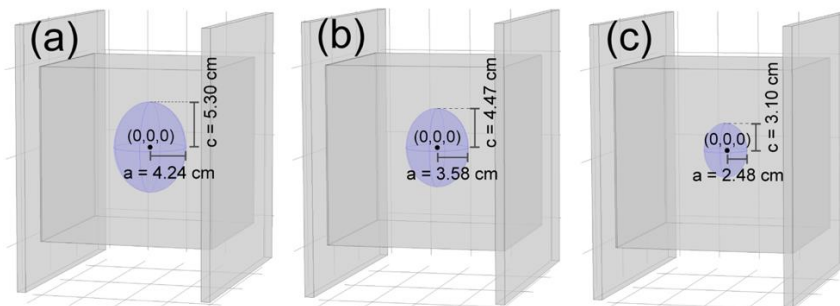


Figure 5 Vertically placed ellipsoids located at (0,0,0) of the water volumes (a) 400 cm^3 , (b) 240 cm^3 , and (c) 80 cm^3 .

ผลการวิจัย

1. ผลการสอบเทียบแบบจำลอง

ผลการจำลองระบบที่มีอากาศเป็นตัวกลางได้รับค่าความจุไฟฟ้า จากโปรแกรมสามารถคำนวณค่าไดอิเล็กทริกของอากาศภายในระบบจากสมการ (3) ได้เท่ากับ 1.00063 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าไดอิเล็กทริก มีค่าเท่ากับ 1.00059 (Zeng *et al.*, 2017) ซึ่งเป็นผลจากการทดลองด้วยเทคนิคไมโครเวฟ พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 0.004 เปอร์เซนต์ เมื่อเปลี่ยนตัวกลางอากาศเป็นน้ำ ค่าไดอิเล็กทริกที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 78.9 และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าไดอิเล็กทริกของน้ำที่มีค่าเท่ากับ 78.4 (Owen *et al.*, 1961) ซึ่งเป็นผลจากการทดลองด้วยวิธี coaxial cavity resonators พบว่ามีความแตกต่าง 0.638 เปอร์เซนต์

การทดสอบผลกระทบของน้ำภายนอกต่อการวัดค่าความจุไฟฟ้าของระบบแสดงใน Figure 6 พบว่า เมื่อน้ำอยู่ใกล้กับระบบมาก ๆ ความจุไฟฟ้าของระบบที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกเป็นอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น 1.37 เปอร์เซนต์ และลดลงตามระยะห่างที่เพิ่มมากขึ้นจนเข้าสู่ค่าความจุไฟฟ้าของอากาศที่ระยะประมาณ 30 cm

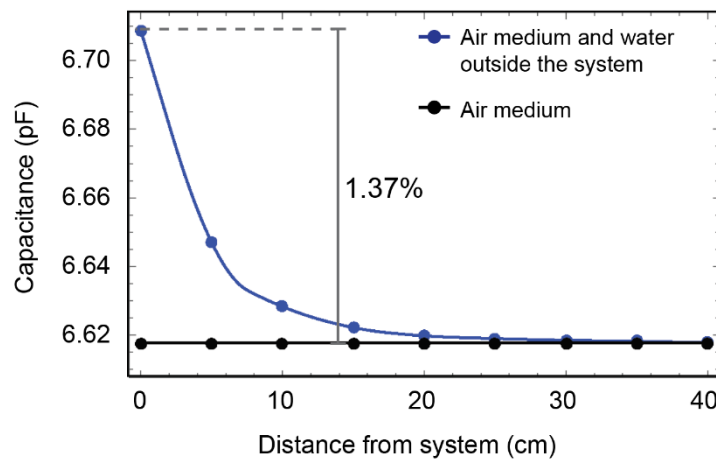


Figure 6 Capacitance of the system as affected by various distances of the water volume.

2. ผลของขนาดต่อค่าความจุไฟฟ้า

Figure 7 แสดงให้เห็นค่าความจุไฟฟ้าเมื่อแทนที่อากาศด้วยน้ำในระบบโดยการเพิ่มอัตราส่วนปริมาตร (Volume ratio) ตั้งแต่ 0-0.1 ชั้นละ 0.01 เมื่ออัตราส่วนปริมาตรมีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือระบบประกอบด้วยอากาศเพียงอย่างเดียว ความจุไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1.79 pF และเมื่ออัตราส่วนปริมาตรเท่ากับ 0.1 ได้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น 2.48 pF เห็นได้ว่าพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนปริมาตรต่อค่าความจุไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันเกือบเป็นเส้นตรง อัตราการเพิ่มขึ้นมีค่าประมาณ 0.0703 pF ต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนปริมาตร 0.01 หน่วย

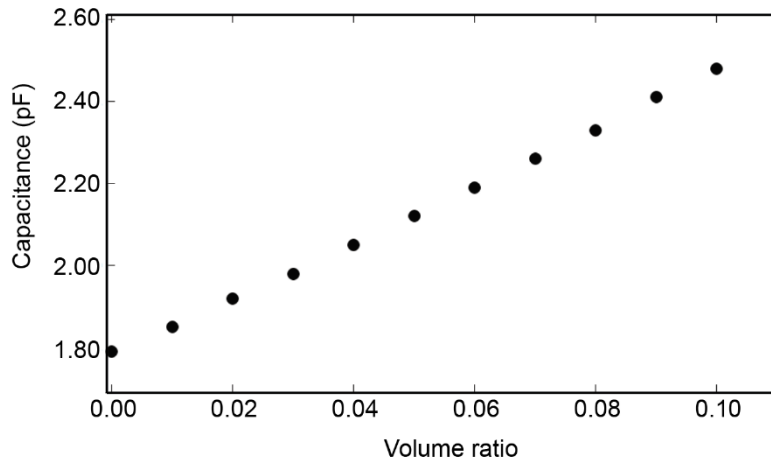


Figure 7 Relationship between the volume ratio and the system capacitance.

3. ผลของรูปทรงต่อค่าความจุไฟฟ้า

การจำลองรูปทรงของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันทั้ง 5 รูปทรง ประกอบด้วย ทรงลูกบาศก์ ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก ทรงกระบอก ทรงกลม และทรงรี ที่วางตำแหน่งเดียวกันของระบบดัง Figure 3 ผลของค่าความจุไฟฟ้าจากการจำลองและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของแต่ละรูปทรงแสดงใน Table 1

Table 1 Capacitance of 400-cm³ water volume for all geometries and their percentage differences.

Shape of water		Cube	Cuboid	Cylinder	Sphere	Ellipsoid
Water shape*	Capacitance (pF)	2.1190	2.0932	2.0744	2.0589	2.0364
Cube	2.1190	0.00%	1.22%	2.10%	2.84%	3.90%
Cuboid	2.0932	-1.23%	0.00%	0.90%	1.64%	2.71%
Cylinder	2.0744	-2.15%	-0.91%	0.00%	0.75%	1.83%
Sphere	2.0589	-2.92%	-1.67%	-0.75%	0.00%	1.09%
Ellipsoid	2.0364	-4.06%	-2.79%	-1.87%	-1.10%	0.00%

*Reference value for percentage difference calculation

Table 2 Capacitance of 400-cm³ water volume for all geometries and their percentage differences when all geometries rotated 90° clockwise about the z-axis.

Shape of water		Cube	Cuboid	Cylinder	Sphere	Ellipsoid
Geometry*	Capacitance (pF)	2.1190	2.1846	2.1394	2.0589	2.1186
Cube	2.1190	0.00%	-3.10%	-0.96%	2.84%	0.02%
Cuboid	2.1846	3.00%	0.00%	2.07%	5.75%	3.02%
Cylinder	2.1394	0.95%	-2.11%	0.00%	3.76%	0.97%
Sphere	2.0589	-2.92%	-6.11%	-3.91%	0.00%	-2.90%
Ellipsoid	2.1186	-0.02%	-3.12%	-0.98%	2.82%	0.00%

*Reference value for percentage difference calculation

จาก Table 1 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของรูปทรงน้ำตาม Figure 3(a)-(e) พบว่ารูปทรงที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าต่างกัน รูปทรงลูกบาศก์เป็นรูปทรงที่มีค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด และรูปทรงรีเป็นรูปทรงที่มีค่าความจุไฟฟ้าน้อยที่สุด ซึ่งมีความแตกต่างกันมากที่สุด 4.06 เปอร์เซ็นต์ และรูปทรงที่มีลักษณะคล้ายกัน เช่น ทรงลูกบาศก์กับทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก หรือ ทรงกลมกับทรงรี มีค่าความจุไฟฟ้าใกล้เคียงกันหรือต่างกันประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์

Table 2 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของรูปทรงน้ำตาม Figure 3(f)-(j) ที่เกิดการหมุนรอบแกน z ของ Figure 3 (a)-(e) ไป 90° ตามเข็มนาฬิกา พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของรูปทรงน้ำสี่เหลี่ยมมุมฉากมีค่ามากที่สุดและรูปทรงกลมมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งมีความแตกต่างกันมากที่สุด 6.11 เปอร์เซ็นต์ และรูปทรงที่มีลักษณะคล้ายกัน เช่น ทรงลูกบาศก์กับทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก หรือ ทรงกลมกับทรงรี มีค่าความจุไฟฟ้าใกล้เคียงกันหรือต่างกันประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์

การจำลองปรับพื้นที่หน้าตัดของทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากและทรงกระบอกที่ปริมาตรคงที่ โดยที่วางปริมาตรให้มีผิวรอยต่อขนานกับแผ่นตัวนำคู่ขนาน พิจารณาค่าความจุไฟฟ้าเมื่อพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงดัง Figure 8

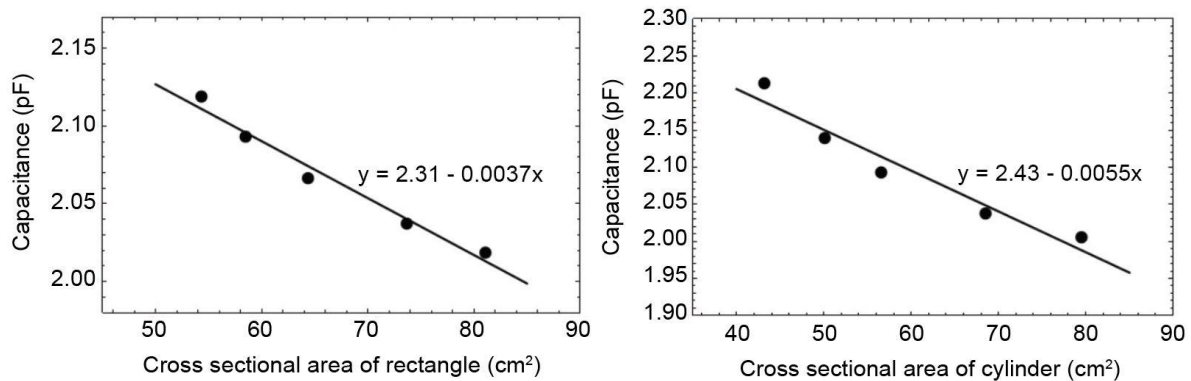


Figure 8 Relationship between the capacitance and the cross-sectional areas of the rectangular volume (left) and the base of cylinders (right).

ความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนแปลงไป (ปริมาตรคงที่) ของทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากและทรงกระบอก พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากและทรงกระบอกลดลงประมาณ 0.0037 และ 0.0055 pF ตามลำดับ เมื่อพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น 1 cm²

4. ผลของตำแหน่งต่อค่าความจุไฟฟ้า

ผลของการวางวัสดุไดอิเล็กทริกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในแผ่นตัวนำคู่ขนานส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้า คือ ความจุไฟฟ้าของระบบมีค่ามากที่สุดเมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ใกล้กับกึ่งกลางแผ่นตัวนำคู่ขนานและมีค่าน้อยลงเมื่อวัสดุอยู่ห่างออกมาจนมีค่าน้อยที่สุดเมื่อวัสดุอยู่ห่างจากแผ่นตัวนำทั้งสองมากที่สุด Figure 9 แสดงค่าความจุไฟฟ้าเมื่อวางน้ำปริมาตร 400 cm³ ไว้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบ

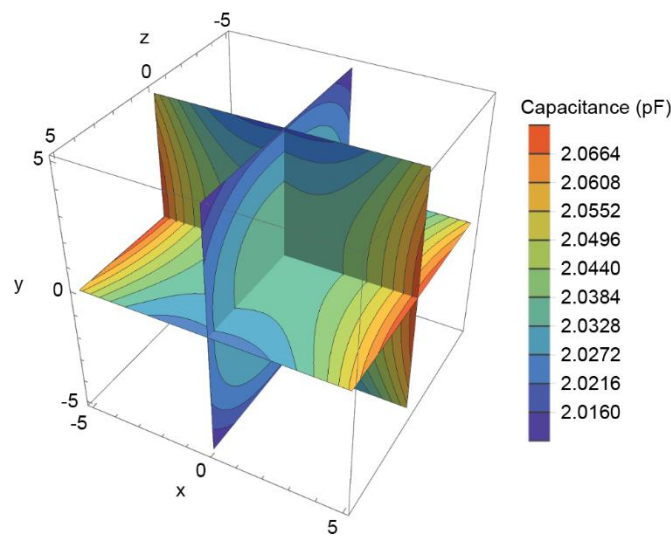


Figure 9 Capacitance variation of 400-cm³ water volume at different locations in 3 dimensions.

Table 3 Percentage differences of the system capacitance for water volumes of 80, 240, and 400 cm³ in different locations.

Water volume (cm ³)	Highest capacitance (pF)	Lowest capacitance (pF)	Percentage difference
80	1.8365	1.8310	0.30
240	1.9439	1.9228	1.10
400	2.0707	2.0087	3.09

Table 3 แสดงผลต่างร้อยละของค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดที่ได้จากการจำลองปรับเปลี่ยนตำแหน่งของปริมาตรน้ำใน 3 แกน พบว่าผลต่างร้อยละของค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อปริมาตรวัสดุไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น

วิจารณ์ผลการวิจัย

1. การสอบเทียบแบบจำลอง

การสอบเทียบการจำลองกระทำเทียบกับแบบจำลองที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกเป็นอากาศและเติมที่ว่างระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนานด้วยน้ำพบว่าค่าไดอิเล็กทริกของอากาศที่ได้จากการจำลองเทียบกับค่าอ้างอิง (Zeng *et al.*, 2017) มีความคลาดเคลื่อนเพียง 0.004 เปอร์เซนต์ และค่าไดอิเล็กทริกของน้ำที่ได้จากการจำลองเทียบกับค่าอ้างอิง (Owen *et al.*, 1961) มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 0.638 เปอร์เซนต์ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของวัสดุและเครื่องมือวัดที่ใช้ในการศึกษาก่อนหน้าต่างจากความเป็นอุดมคติอย่างยิ่งยวดในโปรแกรมจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์และความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขของแบบจำลอง

การตรวจสอบผลกระทบของสิ่งแวดล้อมโดยใช้มวลน้ำทรงกลมเป็นสิ่งรบกวนการวัด พบว่าเมื่อมวลน้ำทรงกลมอยู่ชิดกับระบบการวัดจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากระบบสูงกว่าที่ควรจะเป็นคือค่าความจุไฟฟ้าเมื่อไม่มีมวลน้ำอยู่ใกล้ 1.37 เปอร์เซนต์ ผลกระทบที่เกิดขึ้นเกิดจากมวลน้ำทรงกลมที่นำมาใช้เป็นสิ่งรบกวนมีส่วนส่งเสริมให้สนามฟรินจ์ (Fringe field) ที่บริเวณขอบแผ่นตัวนำคู่ขนานมีค่ามากขึ้นทำให้น้ำเกิดการโพลาไรซ์และประจุผูกมัด (Bound charge) ที่เกิดขึ้นสร้างสนามไฟฟ้าหักล้างกับสนามไฟฟ้าเดิม ทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลง และค่าความจุไฟฟ้าที่ปรากฏมีค่าสูงขึ้นไปด้วยผลการทดลองแสดงว่าผลกระทบนี้ลดลงเมื่อมวลน้ำทรงกลมอยู่ห่างออกไปและหายไปเมื่อมวลน้ำทรงกลมอยู่ห่างจากระบบการวัดเกินกว่า 30 cm

2. ผลของขนาดต่อค่าความจุไฟฟ้า

จาก Figure 7 พบว่าเมื่อปริมาตรของวัสดุไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น (อากาศถูกแทนที่มากขึ้น) ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่ามากขึ้น การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนปริมาตร 0.01 ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนไป 0.0703 pF คิดเป็น 3.32 เปอร์เซนต์ของค่าความจุไฟฟ้าที่อัตราส่วนปริมาตร 0.05 ซึ่งเป็นปริมาตรหลักที่ใช้ทดสอบในการทดลองนี้ ถือได้ว่าผลอันเนื่องมาจากขนาดต่อค่าความจุไฟฟ้ามีค่าน้อย

3. ผลของรูปร่างต่อค่าความจุไฟฟ้า

จากผลการจำลองนี้พบว่ารูปร่างวัสดุไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกันทั้ง 5 นั้นให้ค่าความจุไฟฟ้าต่างกัน เนื่องจากเมื่อวางวัสดุที่จุดกึ่งกลางและวางในแนวในระนาบ xz และ yz สนามไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดการโพลาไรเซชันในวัสดุไดอิเล็กทริกเชิงเส้น ดังสมการ

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (5)$$

\vec{P} คือ โพลาริเซชัน ϵ_0 คือ สภาวะยอมของสุญญากาศ และ χ_e คือ ความอ่อนไหวทางไฟฟ้า (Electric susceptibility) เนื่องจากโพลาริเซชันมีนิยามเป็นไดโพลโมเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ในขณะที่ไดโพลโมเมนต์จะถูกกำหนดโดยขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของวัสดุ (Griffiths, 1999) แต่เพราะปริมาตรและความหนาแน่นของวัสดุไดอิเล็กทริกในการจำลองนี้มีค่าคงที่ จึงแน่ใจว่าผลค่าความจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันดังแสดงในผลการทดลองนั้นเกิดจากรูปร่างของวัสดุไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามในการทดลองโดยใช้วัสดุไดอิเล็กทริกเป็นน้ำที่มีรูปร่างต่างกันใน

ให้ค่าความจุไฟฟ้าแตกต่างกันไม่เกิน 6.11 เปอรเซ็นต์ โดยที่วัสดุไดอิเล็กทริกทรงลูกบาศก์ให้ค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด และวัสดุไดอิเล็กทริกทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากให้ค่าความจุไฟฟ้ารองลงมาและมีค่าใกล้เคียงกัน

สังเกตพบว่ากรณีรูปทรงของวัสดุไดอิเล็กทริกมีด้านขนานและใกล้กับแผ่นตัวนำมากที่สุดจะให้ค่าความจุไฟฟ้าสูงที่สุด เมื่อตรวจสอบสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนานพบว่าสนามไฟฟ้าภายในวัสดุรูปทรงลูกบาศก์ (Figure 10(a), (e) และ (f)) รูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแนวตั้ง (Figure 10(c)) และรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแนวนอน (Figure 10(d)) มีทิศทางไปในทางเดียวกันมากกว่าวัสดุรูปทรงกลม (Figure 10(b)) และทรงรี (Figure 10(g) และ 10(h))

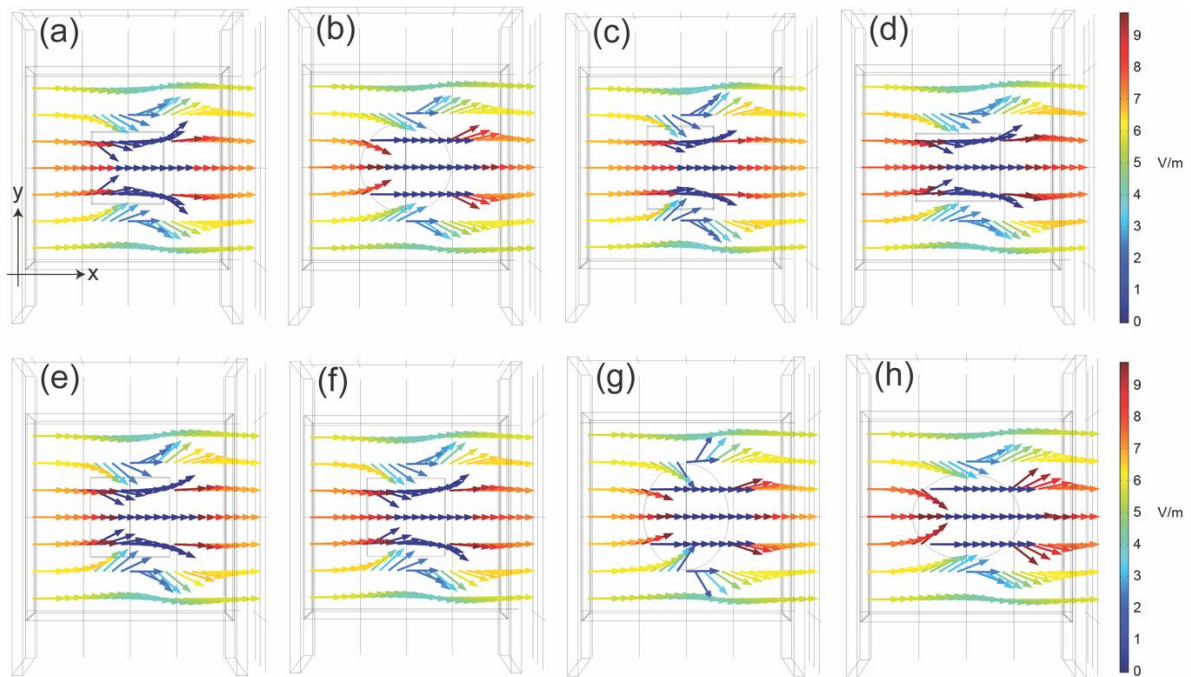


Figure 10 Electric field occurred in the parallel-plate system for water volumes of different geometries--(a) cube, (b) sphere, (c) vertically oriented cuboid, (d) horizontally oriented cuboid, (e) vertically oriented cylinder, (f) horizontally oriented cylinder, (g) vertically oriented ellipsoid, and (h) horizontally oriented ellipsoid. Arrows indicate the direction of the electric field pointing from the left conducting plate toward the conducting plate on the right. Blue-to-red color scale presents the electric field ranging from 0-10 V/m.

กล่าวโดยสรุปได้ว่าผลการจำลองแสดงให้เห็นว่ารูปทรงต่าง ๆ ของวัสดุมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า แต่หากควบคุมอัตราส่วนปริมาตรของวัสดุให้เท่ากันแล้วความจุไฟฟ้าที่ได้จะต่างกันสูงที่สุดไม่เกิน 6.11 เปอรเซ็นต์ ดังนั้นหากทำการทดลองจริงด้วยปริมาตรวัสดุใกล้เคียงกันและวัสดุไดอิเล็กทริกเดียวกัน ผลของการวัดค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกัน

การจำลองปรับเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของรูปทรงที่มีผิวรอยต่อขนานกับแผ่นตัวนำภายใต้ปริมาตรคงที่ ค่าความจุไฟฟ้าของทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากและทรงกระบอกลดลงประมาณ 0.0037 และ 0.0055 pF ตามลำดับ เมื่อพื้นที่หน้าตัด

เพิ่มขึ้น 1 cm² เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาของปริมาตรน้ำลดลงแต่ความหนาของอากาศที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำกับน้ำเพิ่มขึ้น นั่นคือปริมาตรน้ำที่ได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้าลดลงแต่ปริมาตรอากาศได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้ไดโพลโมเมนต์ของอากาศเพิ่มขึ้นและของน้ำลดลง แต่เนื่องจากอากาศมีค่าไดอิเล็กทริกน้อยกว่าน้ำ อิทธิพลของอากาศที่มากขึ้นจึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้า

4. ผลของตำแหน่งต่อค่าความจุไฟฟ้า

การจำลองปรับเปลี่ยนตำแหน่งจาก Figure 9 ใน 3 มิติ ตำแหน่งที่มีค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด คือตำแหน่งกลางแผ่นตัวนำที่อยู่ใกล้กับแผ่นตัวนำทั้งสองฝั่ง ซึ่งมีสนามไฟฟ้าเข้มข้นกว่าและมีความสามารถในการเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลไรซ์ของโมเลกุลไดโพลได้มากกว่า และค่าความจุไฟฟ้าลดลงเมื่อวัสดุเคลื่อนออกจากจุดกึ่งกลางแผ่นตัวนำหรือมีระยะห่างกับแผ่นตัวนำทั้งสองมากขึ้น ทั้งนี้ความแตกต่างของค่าความจุไฟฟ้าในตำแหน่งที่มากที่สุดกับตำแหน่งที่น้อยที่สุดของปริมาตรน้ำ 80 240 และ 400 cm³ มีค่าต่างกัน 0.30 1.10 และ 3.09 เปอรเซ็นต์ตามลำดับ ดังนั้นการจำลองนี้สามารถยืนยันได้ว่าตำแหน่งการจัดวางวัสดุในการทดลองจริงมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าน้อย

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของรูปร่างและตำแหน่งวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีต่อระบบการวัดแบบไม่ทำลายด้วยแผ่นตัวนำคู่ขนาน โดยได้สอบเทียบการจำลองด้วยการวัดค่าไดอิเล็กทริกของตัวกลางอากาศและตัวกลางน้ำ ผลที่ได้มีความแม่นยำสามารถนำการจำลองไปใช้ยืนยันกับระบบการวัดจริงได้ ทั้งยังได้ทดสอบผลกระทบของสิ่งแวดล้อมต่อระบบการวัดพบว่าควรวางระบบการวัดนี้ให้ห่างการวัสดุไดอิเล็กทริกแวดล้อมอื่น ๆ เป็นระยะห่างอย่างน้อย 30 cm

เมื่อทดลองเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ใช้ทดสอบพบว่าเมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่อัตราส่วนปริมาตร 0.05 ค่าความจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไป 3.32 เปอรเซ็นต์ ต่อทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปริมาตร 0.01 ถือว่ามีค่าน้อยมาก

ผลการทดสอบรูปร่างวัสดุไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกันโดยควบคุมให้วัสดุมีปริมาตรเท่ากัน พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากระบบการวัดแตกต่างกันไม่เกิน 6.11 เปอรเซ็นต์ สังเกตพบว่าค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่ามากเมื่อด้านของวัสดุห่างจากแผ่นตัวนำน้อย นอกจากนี้หากวัสดุไดอิเล็กทริกมีรูปร่างใกล้เคียงกันก็จะมีค่าความจุไฟฟ้าต่างกันเพียงประมาณ 3.10 เปอรเซ็นต์ และการทดสอบปรับเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่มีปริมาตรเท่ากัน พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของระบบลดลงเมื่อพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของพื้นที่หน้าตัดทำให้ความหนาของปริมาตรน้ำที่ได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้าลดลงขณะที่ความหนาของอากาศได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้ไดโพลโมเมนต์ของอากาศเพิ่มขึ้นและของน้ำลดลง แต่เนื่องจากอากาศมีค่าไดอิเล็กทริกน้อยกว่าน้ำ อิทธิพลของอากาศที่มากขึ้นจึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าลดลง

ผลการทดสอบตำแหน่งการวางวัสดุในระบบวัดพบว่าค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะระหว่างวัสดุกับแผ่นตัวนำลดลงแต่ความแตกต่างนั้นมีน้อยมากคือไม่เกิน 3.09 เปอรเซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความจุไฟฟ้าในบริเวณใกล้จุดกึ่งกลางระบบมีค่าเท่ากัน

จากผลการทดลองยืนยันได้ว่าการทดสอบวัสดุแบบไม่ทำลายด้วยแผ่นตัวนำคู่ขนานหากวัสดุทดสอบมีลักษณะใกล้เคียงกันแล้ว ตำแหน่งและรูปร่างวัสดุที่นำมาทดสอบจะมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากระบบการวัดน้อยคือไม่เกิน 6.11 เปอรเซ็นต์



กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ (สัญญาเลขที่ 01/2560)

เอกสารอ้างอิง

- Afzal, A., Mousavi, S.F., & Khademi, M. (2010). Estimation of Leaf Moisture Content by Measuring the Capacitance. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12, 339-346.
- Bhosale, A. A. (2017). Detection of sugar content in citrus fruits by capacitance method. *Procedia Engineering*, 181, 466-471.
- Bhosale, A. A., & Sundaram, K. K. (2015). Nondestructive method for ripening prediction of papaya. *Procedia Technology*, 19, 623-630.
- Chaiwarakorn, S., Rojanasuwan, S., & Dorlohseng, Y. (2016). Measurement of concentrated natural latex by parallel plate capacitor technique. *YRU Journal of Science and Technology*, 1(2), 43-52. (in Thai)
- COMSOL Incorporated. (2017). COMSOL Multiphysics 5.3. USA. 6045cb9a9d21.
- Griffiths, D. J. (1999). *Introduction to Electrodynamics*. (3rd ed). New Jersey. Prentice-Hall International, Inc.
- Khaled, D. E., Novas, N., Gazquez, J. A., Garcia, R. M., & Manzano-Agugliaro, F. (2015). Fruit and vegetable quality assessment via dielectric sensing. *Sensors*, 15, 15363-15397.
- Naderi-Boldaji, M., Fazeliyan-Dehkordi, M., Mireei, S.A., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2015). Dielectric power spectroscopy as a potential technique for the non-destructive measurement of sugar concentration in sugarcane. *Biosystems Engineering*, 140, 1-10.



- Nuan-On, A., Angkawisittpan, N., Photong, C., & Siritaratiwat, A. (2015). Detection of water adulteration in honey using coaxial capacitor sensor. *SWU Engineering Journal*, 10(2), 9-18. (in Thai)
- Owen, B. B., Miller, R. C., Milner, C. E., & Cogan, H. L. (1961). The dielectric constant of water as a function of temperature and pressure. *The Journal of Physical Chemistry*, 65(11), 2065-2070.
- Oh, P. S., & Oh, S. J. (2011). What teachers of science need to know about models: An overview. *International Journal of Science Education*, 33(8), 1109-1130.
- Osborne, J. (2014). Teaching scientific practices: Meeting the challenge of change. *Journal of Science Teacher Education*, 25(2), 177-196.
- Praisri, A., Faikhamta, C., Tanak, A., Pongsophon, P., & Jantarakantee, E. (2022). Modeling practice and use in science classroom. *Journal of Education Naresuan University*, 24(1), 349-358. (in Thai)
- Soltani, M., Alimardani, R., & Omid, M. (2010). Prediction of banana quality during ripening stage using capacitance sensing system. *Australian Journal of Crop Science*, 4(6), 443-447.
- Soltani, M., Alimardani, R., & Omid, M. (2011). Design and development of a portable banana ripeness inspection system. *The Journal of American Science*, 7(6), 401-405.
- Thongbai, P. (2013). Electrical polarization and dielectric response. *Thai Journal of Physics*, 30(1-2), 17-23. (in Thai)
- Windschitl, M., & Thompson, J. (2006). Transcending simple forms of school science investigation: The impact of preservice instruction on teachers' understandings of model-based inquiry. *American Educational Research Journal*, 43(4), 783-835.



Yadav, V. S., Sahu, D. K., Singh, Y., & Dhubkarya, D. C. (2010). The Effect of Frequency and Temperature on Dielectric Properties of Pure Poly Vinylidene Fluoride (PVDF) Thin Films. In *Proceeding of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*. (pp 45-53).

Zeng, S., Trontz, A., Zhu, W., Xiao, H., & Dong, J. (2017). A Metal-Ceramic Coaxial Cable Fabry-Pérot Microwave Interferometer for Monitoring Fluid Dielectric Constant. *Sensors and Actuators A: Physical*, 257, 1-7.