

การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกด้วย
วิธีการปรับปรุงลักษณะพื้นผิวของวัสดุพอลิไดเมทิลซิลอกเซน

Power Output Enhancement of Triboelectric Nanogenerator with Surface Modified
polydimethylsiloxane

ปวรปรัชญ์ ฤชา (Pawonpart Luechar)* ดร.วิยะดา หาญชนะ (Dr.Viyada Harnchana)**

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเพิ่มผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกด้วยวิธีการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุพอลิไดเมทิลซิลอกเซนโดยอาศัยการหายใจของยีสต์ โดยการผสมวัสดุพอลิไดเมทิลซิลอกเซนเข้ากับสารละลายยีสต์ที่มีความเข้มข้น 1%-3% w/v ทำให้ยีสต์เกิดการหายใจและสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น ส่งผลให้เกิดรูพรุนบนฟิล์มพอลิไดเมทิลซิลอกเซน โดยทำการศึกษาผลของสารละลายยีสต์ที่เติมในวัสดุพอลิไดเมทิลซิลอกเซนต่อลักษณะพื้นฐานของฟิล์มด้วยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) พบว่า วัสดุ PDMS ที่ได้รับการปรับแต่งพื้นผิวโดยใช้สารละลายยีสต์เกิดรูพรุนขึ้น จากนั้นได้วิเคราะห์ขนาดของรูพรุน พบว่า รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อศึกษาผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก พบว่า วัสดุ PDMS ที่ได้รับการปรับแต่งพื้นผิวที่ใช้สารละลายยีสต์ที่มีความเข้มข้น 3% w/v มีผลลัพธ์ทางไฟฟ้าสูงขึ้น โดยมีขนาดเฉลี่ยของรูพรุนเท่ากับ $6.80 \mu\text{m}^2$ โดยให้ค่าความต่างศักย์สูงสุดเท่ากับ 80 โวลต์และกระแสสูงสุดเท่ากับ 6 ไมโครแอมแปร์

ABSTRACT

In this work, electrical output of triboelectric nanogenerator (TENG) is enhanced by modifying surface of polydimethylsiloxane (PDMS) using fermentation reaction of baker's yeast. PDMS and yeast solution with concentration 1%-3% w/v were mixed and then undergone fermentation reaction of baker's yeast to produce carbon dioxide gas creating porous structure in PDMS surface. Characterization the microstructure of PDMS film shows that the modified PDMS have porous structure on the surface. The average pore size was found to increase with increasing yeast concentration. Electrical output of the TENG with the modified PDMS yeast solution concentration 3 % w/v with average pore size of $6.80 \mu\text{m}^2$, which can generate the highest output voltage and current of 80 V and 6 μA , respectively.

คำสำคัญ: การปรับแต่งพื้นผิว โพลีไดเมทิลซิลอกเซน อุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก

Keywords: Surface modification, Polydimethylsiloxane (PDMS), Triboelectric nanogenerator (TENGs)

*นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ปัจจุบันอุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก (TENG) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจลน์ที่มีความถี่ในช่วง 1-10 Hz (Zi et al., 2016) แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้จากหลักการ ปฏิกิริยาการไฟฟ้าสถิต (Contact electrification) และ การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electrostatic induction) กล่าวคือ เป็นการผลิตไฟฟ้าโดยการนำวัสดุที่แตกต่างกันสองชนิดมาสัมผัสหรือเสียดสีกัน ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าสถิตบนพื้นผิวและเมื่อพื้นผิวมีการเคลื่อนที่ออกจากกันจะเกิดความต่างศักย์อันเกิดจากประจุเหล่านี้ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ โดยมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก เช่น ขนาดของพื้นที่ผิวสัมผัส ประจุที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุทริโบอิเล็กทริก ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ การนำไฟฟ้าของขั้วตัวนำ เป็นต้น (Niu et al., 2013) โดยทั่วไปแล้วนิยมนำ Polydimethylsiloxane (PDMS หรือ Silicone) มาใช้เป็นวัสดุทริโบอิเล็กทริก เนื่องจากแสดงสมบัติเป็นขั้วลบทางทริโบอิเล็กทริก (Negative triboelectric material) ที่สูงมาก ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุ PDMS เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง ทนทานต่อการกระแทกและเสียดสี และยังสามารถปรับแต่งพื้นผิวได้ จากที่กล่าวมาวัสดุพอลิเมอร์ PDMS จึงเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ประดิษฐ์อุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก ได้มีการรายงานการปรับปรุงพื้นที่ผิวสัมผัส เพื่อเพิ่มผลลัพธ์ทางไฟฟ้าซึ่งทำหลายวิธี เช่น การทำให้เกิดลวดลายขึ้นบนผิวของวัสดุพอลิเมอร์ (Patterned surface) หรือใช้เส้นลวดนาโน (Nanowire) เพื่อให้เกิดลวดลายบนพื้นผิว (Ko et al., 2014) มีการใช้สารละลาย NaOH ฉีดลงบนผิววัสดุ PDMS เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (Yun et al., 2015) มีการใช้เทคนิคพลาสมา (Plasma treated) ด้วยก๊าซอาร์กอน (Ag) (Cheng et al., 2017) เพื่อทำให้ผิวของวัสดุมีความขรุขระ และมีการใช้เทคนิคเดียวกันนี้ด้วยฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) (Kim et al., 2017) ในการเพิ่มผลลัพธ์ทางไฟฟ้า มีการปรับแต่งพื้นผิวของวัสดุ PDMS ให้มีลักษณะเป็นพีระมิดระดับไมครอน (Micropyramids) (Li et al., 2019) นอกจากนี้ยังมีการทำให้พื้นผิวมีลักษณะคล้ายฟองน้ำโดยการนำวัสดุ PDMS อบในหม้อนึ่งอัตโนมัติ (Autoclave) (Xua et al., 2019) ซึ่งเทคนิคเหล่านี้มีความซับซ้อน ต้องใช้เครื่องมือชั้นสูง และมีค่าใช้จ่ายสูง ในงานวิจัยนี้ได้มีการคิดค้นเทคนิคใหม่ นั่นคือการผสมยีสต์ลงไปโพลิเมอร์ โดยอาศัยหลักการหายใจของยีสต์ เมื่อยีสต์ได้รับอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต ยีสต์จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาจากนั้นเมื่อนำไปผสมกับโพลิเมอร์จะทำให้เกิดเป็นฟองอากาศที่ผิวของพอลิเมอร์ PDMS ซึ่งเมื่อนำพอลิเมอร์ดังกล่าวไปขึ้นรูปจะได้ฟิล์มที่มีลักษณะรูพรุนเกิดขึ้น (Parameswarana, Gupta, 2018) ข้อดีของวิธีนี้คือ มีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายน้อย และยังสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาปฏิบัติการหายใจของยีสต์ใน PDMS โดยการผสม PDMS เข้ากับ สารละลายยีสต์ เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างและลักษณะสัณฐานของฟิล์ม PDMS และผลลัพธ์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นที่คาดหวังว่าจะสามารถควบคุมลักษณะสัณฐานของฟิล์ม PDMS นี้ได้ ซึ่งส่งผลต่อผลลัพธ์ทางไฟฟ้าที่สูงขึ้นตามลำดับ

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. สังเคราะห์และปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ PDMS โดยใช้ปฏิบัติการหายใจของยีสต์เพื่อใช้เป็นวัสดุทริโบอิเล็กทริกสำหรับอุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก
2. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายยีสต์และสารละลายอาหารยีสต์ ต่อลักษณะสัณฐานของ PDMS และผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าสูงสุด
3. ศึกษาลักษณะสัณฐานฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

4. เพื่อศึกษาเงื่อนไขการทำงานและปัจจัยที่มีผลต่อผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก

วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งวิธีการวิจัยออกเป็นสามส่วนๆหลักคือ การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ PDMS การประดิษฐ์อุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก และ การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของฟิล์ม PDMS ที่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก

การปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ PDMS นั้นแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ การเตรียมวัสดุ PDMS โดยการผสม silicone elastomer และ curing agent ในอัตราส่วน 1 : 10 (SYLGARD™ 184) และเตรียมสารละลายยีสต์ (Perfect Instant yeast) โดยการผสมยีสต์ น้ำตาล และน้ำ DI ซึ่งมีการเตรียมสารละลายยีสต์ความเข้มข้น 1% w/v, 2% w/v และ 3% w/v เพื่อทำการผสมสารละลายยีสต์เข้ากับวัสดุ PDMS ในอัตราส่วน 0.4 ml ต่อ 2.5 g จากนั้นสารละลายยีสต์ที่ผสมกับวัสดุ PDMS ถูกนำไปเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าเพื่อประกอบเป็นอุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก จากนั้นนำไปเพื่อขึ้นรูปฟิล์มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้ได้ฟิล์มของวัสดุ PDMS ที่มีลักษณะเป็นรูพรุนเกิดขึ้น

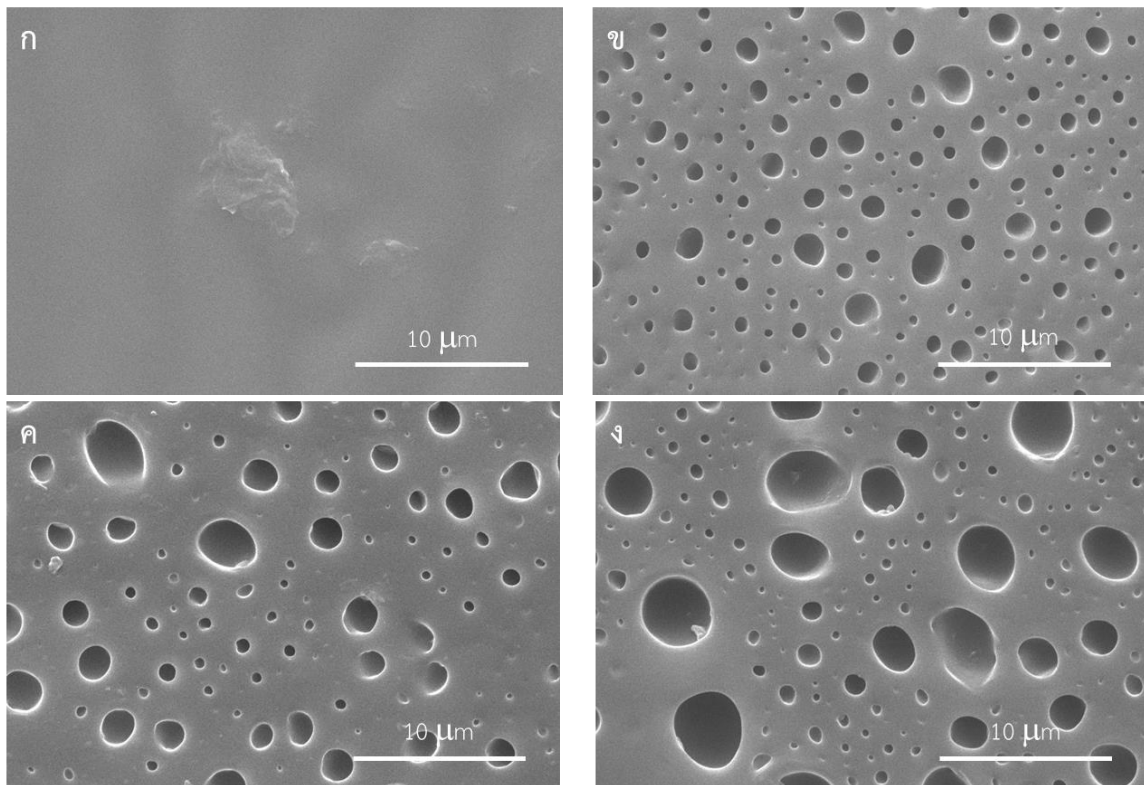
ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกที่ประดิษฐ์ จะถูกทดสอบด้วย ออสซิลโลสโคป (Tektronix DPO2002B) และแอมป์มิเตอร์แบบดิจิตอล (Kiethley DMM6500) และลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นบนผิวฟิล์ม PDMS จะใช้เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

ผลการวิจัย

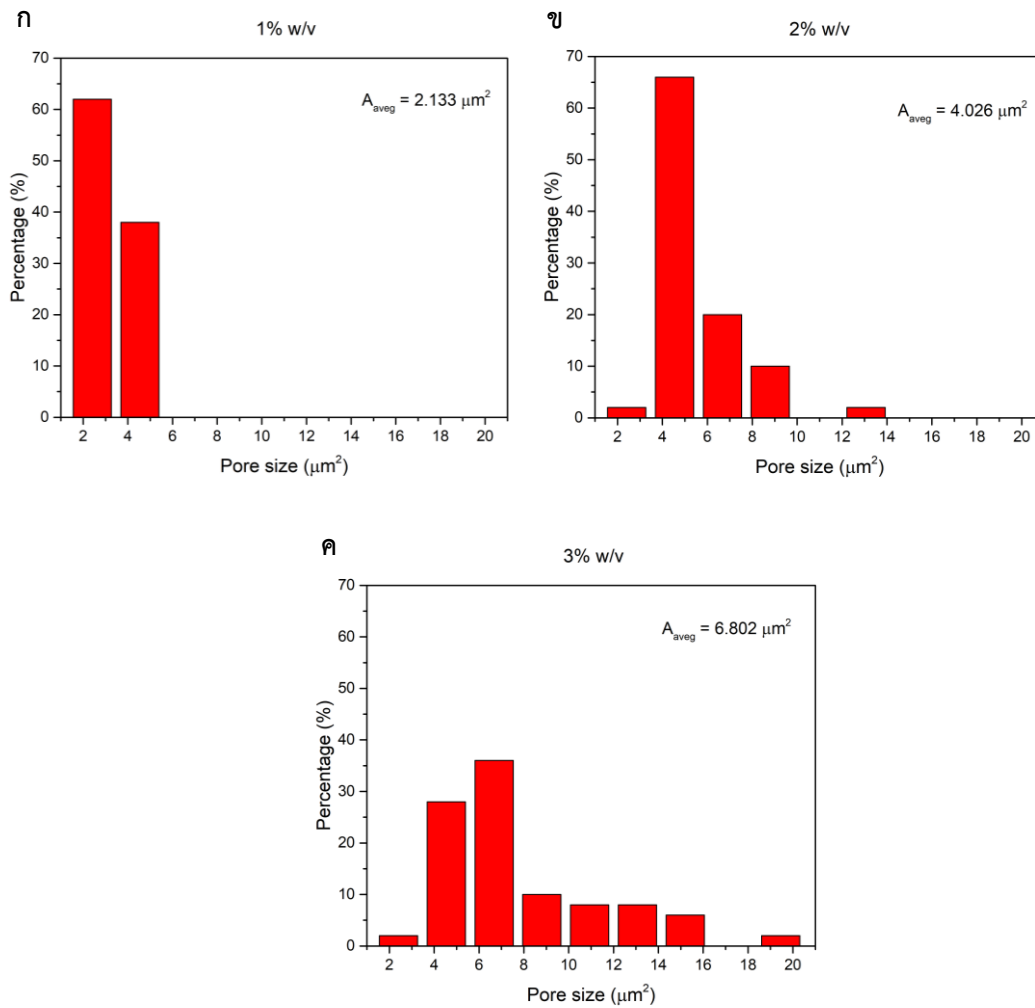
1. ผลการศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุ PDMS ที่ไม่ได้ปรับแต่งพื้นผิวเทียบกับวัสดุ PDMS ที่ปรับแต่งพื้นผิวโดยใช้ยีสต์ โดยเทคนิค SEM

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคระหว่างวัสดุ PDMS ที่ไม่ได้รับการปรับแต่งพื้นผิวกับวัสดุ PDMS ที่ได้รับการปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารละลายยีสต์เป็นดังที่แสดงในรูปที่ 1 และจากข้อมูลดังกล่าวสามารถวิเคราะห์หาขนาดของรูพรุนบนฟิล์ม PDMS ที่ปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารละลายยีสต์ดังรูปที่ 2

รูปที่ 1 : แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของวัสดุ PDMS โดยที่ภาพ ก เป็นภาพของวัสดุ PDMS ที่ไม่ได้รับการปรับแต่งพื้นผิว โดยผิวฟิล์มจะมีลักษณะเรียบ ส่วนภาพ ข ค และ ง คือ ภาพผิวหน้าของวัสดุ PDMS ที่ได้รับการปรับแต่งพื้นผิวโดยใช้สารละลายยีสต์ความเข้มข้น 1% w/v, 2% w/v และ 3% w/v ตามลำดับ สังเกตได้ว่าผิวฟิล์มมีลักษณะขรุขระและมีรูพรุนเกิดขึ้น โดยจะเห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ มีผลต่อขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้น ที่ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ 1% w/v นั้นรูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่า ความเข้มข้น 2% w/v และที่ความเข้มข้น 3% w/v นั้นขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ที่สุด กล่าวคือขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นนั้นแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายยีสต์สูงจะทำให้เกิดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่



รูปที่ 1 (ก) แสดงภาพถ่ายพื้นผิวของวัสดุ PDMS ที่ไม่ได้ปรับแต่งพื้นผิว
(ข, ค, ง) แสดงภาพถ่ายพื้นผิวของวัสดุ PDMS ที่ปรับแต่งพื้นผิวโดยการผสมสารละลายยีสต์ความ
เข้มข้น 1% w/v, 2% w/v, 3% w/v ตามลำดับ

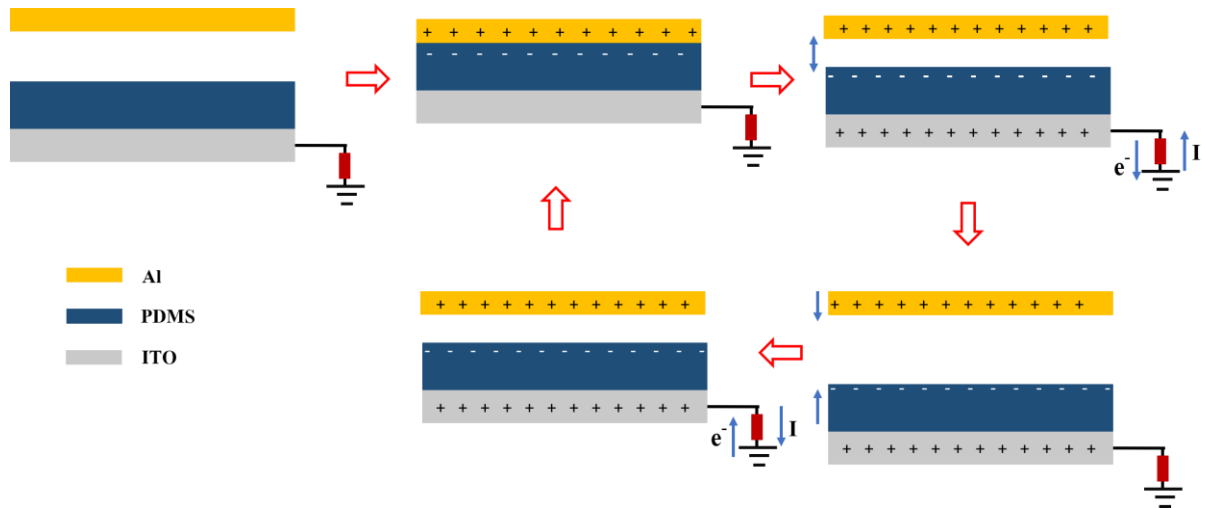


รูปที่ 2 (ก, ข, ค) แสดงการกระจายตัวของขนาดของรูพรุนบนฟิล์ม PDMS ที่ปรับแต่งพื้นผิวด้วยสารละลายยีสต์ความเข้มข้น 1% w/v, 2% w/v และ 3% w/v ตามลำดับ

จากรูปที่ 2 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนบนผิวฟิล์ม PDMS ที่ผสมสารละลายยีสต์ความเข้มข้น 1% w/v, 2% w/v และ 3% w/v ตามลำดับ โดยสารละลายยีสต์ความเข้มข้น 1% w/v มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย $2.133 \mu m^2$ ที่ความเข้มข้น 2% w/v มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย $4.026 \mu m^2$ และที่ความเข้มข้น 3% w/v มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย $6.802 \mu m^2$ จากข้อมูลดังกล่าว จึงยืนยันได้ว่า ความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ส่งผลต่อขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้น โดยที่ความเข้มข้นมากขึ้นขนาดของรูพรุนจะใหญ่ขึ้น

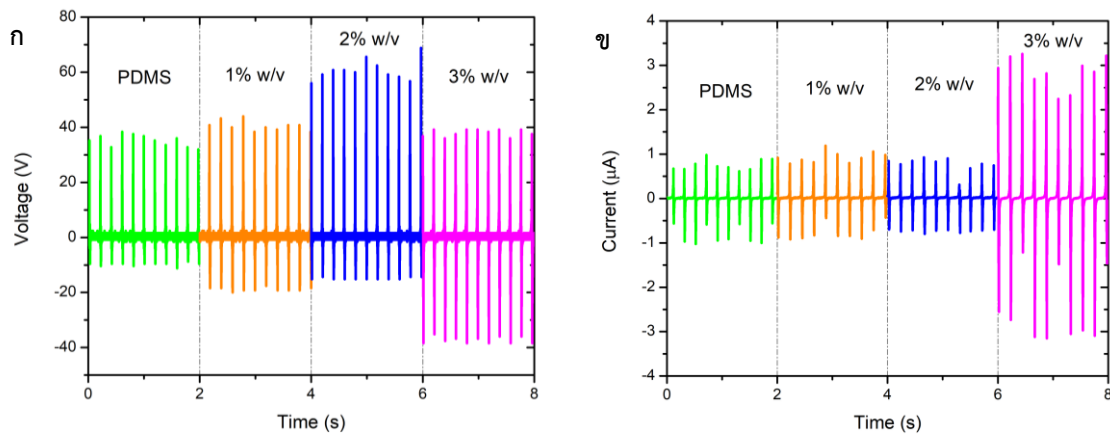
2. การศึกษาผลลัพท์ทางไฟฟ้าของ TENG จากวัสดุ PDMS ที่ปรับแต่งพื้นผิวโดยใช้ยีสต์

การศึกษาผลลัพท์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยอาศัยหลักการทํางาน TENG ภายใต้รูปแบบการทํางานแบบ single electrode mode จากรูปที่ 3 แผ่นอะลูมิเนียม (Al) ถูกนำมาเป็นขั้วอิเล็กโทรด เพื่อที่นำมาใช้สัมผัสกับวัสดุ PDMS ที่เคลือบอยู่บนกระจกนำไฟฟ้า (ITO) ในสถานะเริ่มต้นที่วัสดุทั้งสองยังไม่สัมผัสกันจะไม่มีเกิดการถ่ายเทประจุเกิดขึ้นทำให้ไม่มีศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น จากนั้นเมื่อวัสดุทั้งสองสัมผัสกันจะเกิดการถ่ายเทประจุระหว่างอะลูมิเนียมและ PDMS ทำให้เกิดประจุบวกที่ผิวของอะลูมิเนียมและประจุลบที่ผิวของ PDMS จากนั้นเมื่อวัสดุทั้งสองแยกออกจากกัน ความต่างศักย์ที่เกิดจากประจุที่ผิว PDMS ผลักให้อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่บน ITO วิ่งลงสายดินเพื่อทำให้ประจุบน PDMS เป็นกลางจากนั้นที่ผิวของ ITO เกิดประจุบวกขึ้นและทำให้เกิดสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ติดลบขึ้น จากนั้นเมื่อวัสดุทั้งสองเคลื่อนที่มาสัมผัสกันอีกครั้ง ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระในกระจกนำไฟฟ้าลดลง ดังนั้นอิเล็กตรอนเหล่านั้นจึงไหลจากสายดินเข้าไปที่กระจกนำไฟฟ้าเพื่อทำให้กระจกนำไฟฟ้าที่มีประจุบวกเป็นกลางทางไฟฟ้าทำให้ได้สัญญาณความต่างศักย์ที่เป็นบวก (Harnchana, 2018)



รูปที่ 3 แสดงหลักการทํางานของ TENG ภายใต้รูปแบบการทํางานแบบ single electrode mode

การศึกษามลลัพท์ทางไฟฟ้าของ TENG ที่เกิดขึ้น โดยการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุ PDMS ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวกับ PDMS ที่ผสมกับสารละลายยีสต์ความเข้มข้น 1% w/v, 2% w/v และ 3% w/v ในอัตราส่วน สารละลายยีสต์ ต่อ วัสดุ PDMS เท่ากับ (0.4 ml : 2.5 g) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษามลลัพท์ทางไฟฟ้าสองอย่างคือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า ตามลำดับที่แสดงในรูปที่ 4 โดยพบว่า เมื่อมีการผสมสารละลายยีสต์ความเข้มข้น 1% w/v และ 2% w/v ลงใน PDMS ให้ค่าความต่างศักย์ที่มากขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มสารละลายยีสต์ความเข้มข้นเป็น 3% w/v จะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน



รูปที่ 4 (ก) แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบวัสดุ PDMS ที่ไม่ผสมสารละลายยีสต์และวัสดุ PDMS ที่ผสมสารละลายยีสต์ความเข้มข้น 1% w/v, 2% w/v และ 3% w/v
(ข) แสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบวัสดุ PDMS ที่ไม่ผสมสารละลายยีสต์และวัสดุ PDMS ที่ผสมสารละลายยีสต์ความเข้มข้นความเข้มข้น 1% w/v, 2% w/v และ 3% w/v

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเมื่อทำการปรับปรุงพื้นที่ผิวของวัสดุ PDMS โดยการผสมสารละลายยีสต์ ซึ่งอาศัยหลักการหายใจของยีสต์แล้วให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา โดยก๊าซนี้จะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นบนผิวฟิล์มของวัสดุ PDMS ซึ่งยืนยันได้จากภาพถ่าย SEM โดยรูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดเฉลี่ยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายยีสต์ที่ผสมกับวัสดุ PDMS กล่าวคือ สารละลายยีสต์ที่มีความเข้มข้นสูงทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้พื้นผิวในการสัมผัสและเสียดสีเพิ่มขึ้นและสามารถกักเก็บอนุภาคนาโนไว้บริเวณรูพรุนอีกด้วย ซึ่งปัจจัยที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นส่งผลให้ค่าผลลัพธ์ทางไฟฟ้าสูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุน พสวท. ที่มอบทุนการศึกษา ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนการใช้เครื่องมือในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ ผศ.ดร. วิยะดา หาญชนะ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยเป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Cheng G, Jiang S, Li K, Zhang Z, Wang Y, Yuan N, et al. Effect of argon plasma treatment on the output performance of triboelectric nanogenerator. *Applied Surface Science*. 2017; 412:350-356.
- Harnchana V, Ngoc H, He W, Rasheed A, Park H, Amornkitbamrung V, et al. Enhanced Power Output of a Triboelectric Nanogenerator using Poly(dimethylsiloxane) Modified with Graphene Oxide and Sodium Dodecyl Sulfate. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018 25263–25272.

- Kim MK, Kim MS, Kwon H, Jo S, Kim YJ. Wearable triboelectric nanogenerator using a plasma-etched PDMS–CNT composite for a physical activity sensor. *Royal Society of Chemistry*. 2017; 7:48368-48373.
- Ko Y, Lee S, Leem J, Yu J. High transparency and triboelectric charge generation properties of nano-patterned PDMS. *RSC Advances*. 2014; 4:10216–10220.
- Li Z, Li H, Fan Y, Liu L, Chen Y, Zhang C, et al. Small-Sized, Lightweight, and Flexible Triboelectric Nanogenerator Enhanced by PTFE/PDMS Nanocomposite Electret. *Applied materials interfaces*. 2019; 11:20370-20377.
- Niu S, Wang S, Lin L, Liu Y, Zhou Y, Hua Y, et al. Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source. *Energy & Environmental Science*. 2013;6(12):3576-3583.
- Parameswarana C, Gupta D. Low cost sponge based piezocapacitive sensors using a single step leavening agent mediated autolysis process. *Journal of Materials Chemistry C*. 2018;6(20):5473-5481.
- Xua H, Kimb J, Kim S, Hwang H, Maurya D, Choic D, et al. Double layered dielectric elastomer by vapor encapsulation casting for highly deformable and strongly adhesive triboelectric materials. *Nano energy*. 2019; 62:145-153.
- Yun B, Kim J, Kim H, Jung K, Yi Y, Jeong M, et al. Base-treated polydimethylsiloxane surfaces as enhanced triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*. 2015; 15:523-529.
- Zi Y, Guo H, Wen Z, Yeh M, Hu C, Wang Z. Harvesting Low-Frequency (<5 Hz) Irregular Mechanical Energy: A Possible Killer Application of Triboelectric Nanogenerator. *ACS Nano*. 2016;4(10):4797-4805.