

การประดิษฐ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกเชิงกลจากฟิล์มยางธรรมชาติ Fabrication Of Triboelectric Nanogenerator Form Natural Rubber Film

อินทอร อัมปะมะโต (Intuorn Appamato)* ดร.วิยะดา หาญชนะ (Dr.Viyada Harnchana)**

ดร.วิทยา อมรภิจักร์ (Dr.Vittaya Amornkitbamrung)***

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประดิษฐ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator; TENG) จากยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เพื่อใช้เก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยศึกษาผลของความถี่ของแรงเชิงกลต่อผลลัพธ์ทางไฟฟ้า และศึกษาผลของโหลดตัวต้านทานต่อความหนาแน่นกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกที่ประดิษฐ์จากวัสดุยางธรรมชาติ พบว่าการเก็บเกี่ยวพลังงานต่อความถี่ของการให้แรงเชิงกลตั้งแต่ 2-10 รอบต่อวินาที สามารถให้ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าสูงถึง 102 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 8.3 ไมโครแอมแปร์ ที่ความถี่สูงสุด 10 รอบต่อวินาที และการศึกษาการวัดความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 5 รอบต่อวินาที พบว่าที่โหลดตัวต้านทานขนาด 1 เมกะโอห์ม ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ได้จะมีความมากที่สุดคือ 250 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร นอกจากนี้การทดสอบประสิทธิภาพความเสถียรของผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกมีค่าสูงถึง 95.08 เปอร์เซ็นต์ ที่การทำงาน 4,000 รอบ และทำให้หลอด LEDs จำนวน 50 ดวง สว่างได้

ABSTRACT

In this work, a natural rubber (NR) triboelectric nanogenerator (TENG) device is fabricated to convert mechanical energy into electricity. The effect of applied mechanical frequency on electrical output is investigated. The delivered power density of the NR TENG at various load resistances is determined. it is found that the electrical outputs are proportional mechanical frequency and the highest voltage and current are 102 volts and current 8.3 μ A, respectively, at 10 Hz frequency. The maximum power density of 250 mW/m² is achieved at a match load resistance of 1 M Ω at 5 Hz frequency. The NR TENG exhibits good performance stability of 95.08% over 4,000 cycles. The application of the NR TENG to light up 50 LEDs is demonstrated.

คำสำคัญ: แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโน ทริโบอิเล็กทริก ยางธรรมชาติ

Keywords: Nanogenerator, Triboelectric, Natural rubber

* นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*** รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

การเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy harvesting หรือ Energy scavenging) เป็นการเก็บเอาพลังงานจากแหล่งกำเนิดพลังงานในสิ่งแวดล้อม หรือพลังงานเหลือใช้ (Waste energy) มาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า นับเป็นทางเลือกที่สำคัญในการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการด้านพลังงานที่สูงขึ้น พลังงานเชิงกลเป็นพลังงานสะอาด เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และมีอยู่อย่างไม่จำกัด ซึ่งได้แก่ พลังงานจากการไหลของกระแส น้ำ คลื่น ในมหาสมุทร พลังงานในหยดน้ำฝน พลังงานจากการสั่นหรือการเคลื่อนที่ของสิ่งต่างๆ เช่น การเคลื่อนไหวของร่างกายของมนุษย์ เป็นต้น การเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลเหล่านี้จึงถือว่าเป็นความท้าทายในการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญที่สามารถเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อชีวิตของมนุษย์ได้ในอนาคต (Putson, 2012)

Triboelectric nanogenerator (TENG) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีรูปแบบใหม่สำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยปรากฏการณ์ทริโบอิเล็กทริก (Triboelectricity) หรือปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิต ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อวัสดุสองชนิดสัมผัสและแยกออกจากกัน จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าที่ผิววัสดุ แรงกระตุ้นเชิงกลทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างวัสดุขึ้น (Tang et al., 2018; Wu et al., 2019) โดยทั่วไปวัสดุทุกชนิดสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์ทริโบอิเล็กทริกได้

ในการศึกษาแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกที่เริ่มแพร่หลาย พบว่ามีการใช้วัสดุจำพวกเซรามิกส์ในการประดิษฐ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก ซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่องของน้ำหนัก สมบัติด้านการยืดหยุ่นและการออกแบบรูปทรงที่ซับซ้อน เนื่องจากเซรามิกส์มีสมบัติเป็นของแข็งและมีการจัดเรียงโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบทำให้ขาดความยืดหยุ่น เปราะและแตกหักง่าย ทำให้เกิดความสนใจในการเลือกใช้วัสดุพอลิเมอร์เข้ามาแทน ซึ่งพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีสมบัติโดดเด่นด้านความยืดหยุ่น สามารถขึ้นรูปให้ได้โครงสร้างที่ซับซ้อน มีความคงทนไม่เปราะแตก และน้ำหนักเบาสามารถตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าได้ดีแม้ที่ระดับกระแสไฟฟ้าต่ำๆ จึงถือเป็นทางเลือกใหม่ที่ดีสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกในการเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่มีการนำมาใช้ประดิษฐ์เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกนี้ได้แก่ พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) พอลิยูรีเทน (PU) เป็นต้น (Jing and Kar-Narayan., 2018; Mishra et al., 2018; Yang et al., 2018) แต่พอลิเมอร์เหล่านี้ล้วนเป็นวัสดุที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้มีราคาแพงในขั้นตอนของการศึกษา จากปัญหาของงานและข้อจำกัดนี้ ผู้วิจัยจึงได้มองหาวัสดุทดแทนที่มีสมบัติและประสิทธิภาพเพียงพอต่อการตอบสนองกับงานวิจัยนี้

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ถือได้ว่าเป็นแหล่งวัสดุที่มีอยู่อย่างไม่จำกัดภายในประเทศไทย สามารถหาได้ง่าย มีราคาถูก และสามารถขึ้นรูปทรงต่าง ๆ ได้ง่าย การเลือกใช้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุในการประดิษฐ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกจึงเป็นการนำเสนอวัสดุทางเลือกที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก อีกทั้งสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ คือเป็นอีลาสโตเมอร์ ที่มีความยืดหยุ่นสูง เหนียว มีความเป็นฉนวนสูง มีน้ำหนักเบา ทนทานต่อสารเคมี สามารถใช้งานได้ ตั้งแต่อุณหภูมิ -55 จนถึง 70 องศาเซลเซียส (พดพิพงศ์ พันธมนัสโสภา, 2557) นับว่าเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมาะสมอย่างยิ่งในการนำไปใช้งานเป็นวัสดุในการประดิษฐ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกจากวัสดุยางธรรมชาติที่สามารถเปลี่ยนพลังงานเชิงกลเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งสามารถใช้งานได้จริง
2. เพื่อศึกษาผลของความถี่ของแรงเชิงกลต่อผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกที่ประดิษฐ์จากวัสดุยางธรรมชาติ
3. เพื่อศึกษาผลโหลดตัวต้านทานต่อความหนาแน่นกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกที่ประดิษฐ์จากวัสดุยางธรรมชาติ
4. เพื่อปรับปรุงผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกที่ประดิษฐ์จากวัสดุยางธรรมชาติให้สูงพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานได้

วิธีการวิจัย

1. วิธีการการประดิษฐ์ทริโบอิเล็กทริกจากยางธรรมชาติ

ขึ้นรูปยางธรรมชาติบนกระจกนำไฟฟ้า โดยการเตรียมน้ำยางธรรมชาติ ชนิดน้ำยางธรรมชาติเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ ประเภทแอมโมเนียความเข้มข้นสูง ปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำยางธรรมชาติขึ้นรูปฟิล์มขนาด 4x4 ตารางเซนติเมตร ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ต่อหนึ่งชิ้นงาน ด้วยวิธีการเทปาด (Casting) ตากฟิล์มที่เตรียมได้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และ 80 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปทดสอบผลลัพธ์ทางไฟฟ้าด้วยเครื่องแปลงพลังงานเชิงกลแบบ Vertical contact-separation mode with single-electrode mode ดังแสดงรูปที่ 1b) การทดสอบผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกที่ประดิษฐ์จากวัสดุยางธรรมชาตินี้ มีองค์ประกอบที่ใช้ในการทดสอบผลลัพธ์ทางไฟฟ้าประกอบด้วย ชั้นแผ่นเทฟลอน และชั้นฟิล์มยางธรรมชาติ

2. การทดสอบวัดผลลัพธ์ทางไฟฟ้า

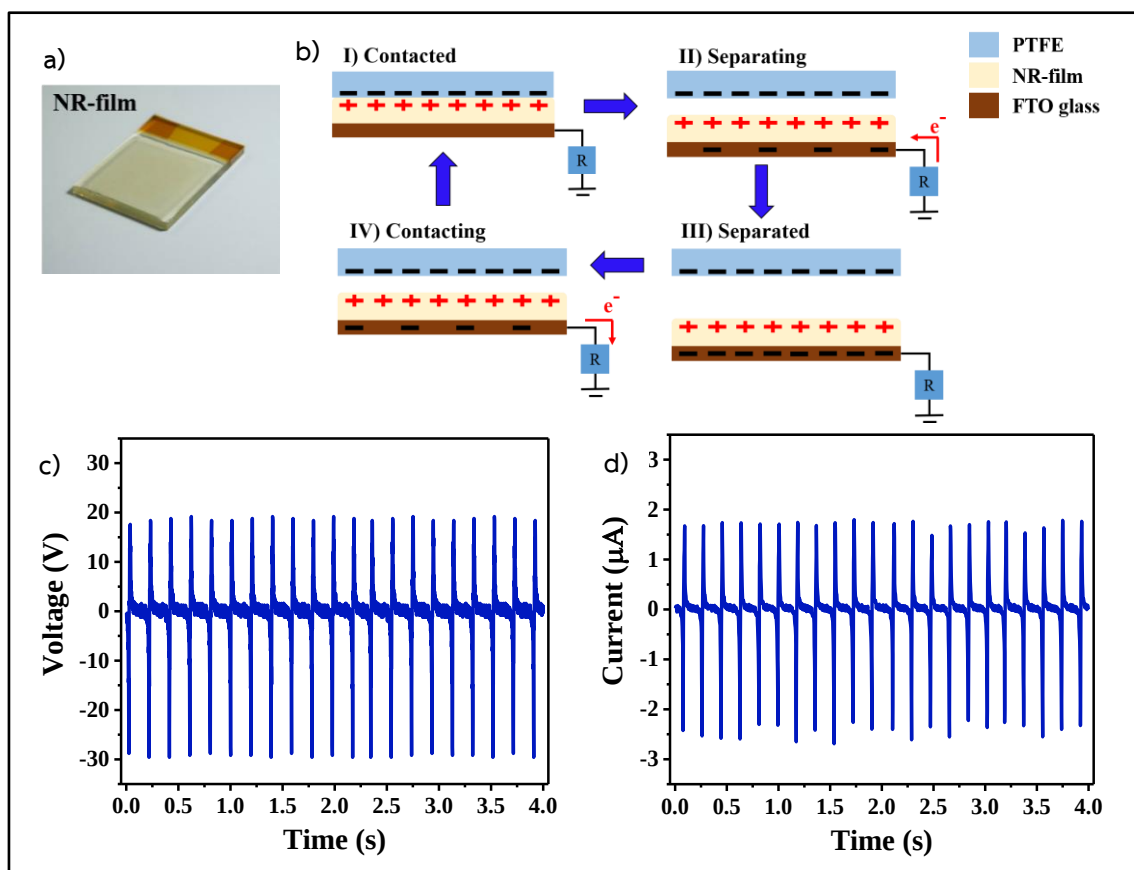
ทำการทดสอบผลลัพธ์ทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยเครื่อง Oscilloscope DS1054 และค่ากระแสไฟฟ้าด้วยเครื่อง Keithley 6514 โดยฟิล์มยางธรรมชาติที่เตรียมไว้ ทำการทดสอบด้วยเงื่อนไขดังนี้

- 1) ทดสอบผลลัพธ์ทางไฟฟ้าจากฟิล์มยางธรรมชาติ ทั้งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และกระแสไฟฟ้าวงจรปิด (I_{sc})
- 2) ทดสอบผลลัพธ์ทางไฟฟ้าที่ขึ้นกับรอบความถี่ที่ใช้ในการให้แรงเชิงกล 2-10 รอบต่อวินาที
- 3) ทดสอบผลลัพธ์ทางไฟฟ้าที่ขึ้นกับตัวต้านทานขนาด 1-100 M Ω เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการนำไปใช้งานจริงของฟิล์มธรรมชาติที่ใช้เป็นวัสดุทริโบอิเล็กทริกในแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก

ผลการวิจัย

1. การประดิษฐ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกจากวัสดุฟิล์มยางธรรมชาติ

แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกจากแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบาง ผิวเรียบ และมีสีเหลืองอ่อนใส ซึ่งเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า ดังในรูปที่ 1a) การเกิดไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกอาศัยปรากฏการณ์ทริโบอิเล็กทริก (Triboelectrification effect) ที่เกิดจากปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิตจากการสัมผัส (Contact electrification) และการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electrostatic induction) ของวัสดุสองชนิดที่มีขั้วต่างกัน เมื่อวัสดุทั้งสองมีการสัมผัสและแยกออกจากกัน จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าที่ผิววัสดุ เกิดเป็นสนามไฟฟ้า (Electric field) ขึ้นระหว่างผิววัสดุทั้งสองนี้ ดังรูปที่ 1b) สนามไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า เมื่อทำการต่อวงจรให้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองเชื่อมต่อกัน จะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอุปกรณ์ทางไฟฟ้าได้ (Putson, 2012; Tang et al., 2018; Wu et al., 2019) จากการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกจากวัสดุฟิล์มยางธรรมชาตินี้ พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) สูงสุดเท่ากับ 48.8 โวลต์ และค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิด (I_{sc}) เท่ากับ 4.42 ไมโครแอมแปร์ แสดงผลดังกราฟในรูปที่ 1c) และ 1d) ตามลำดับ



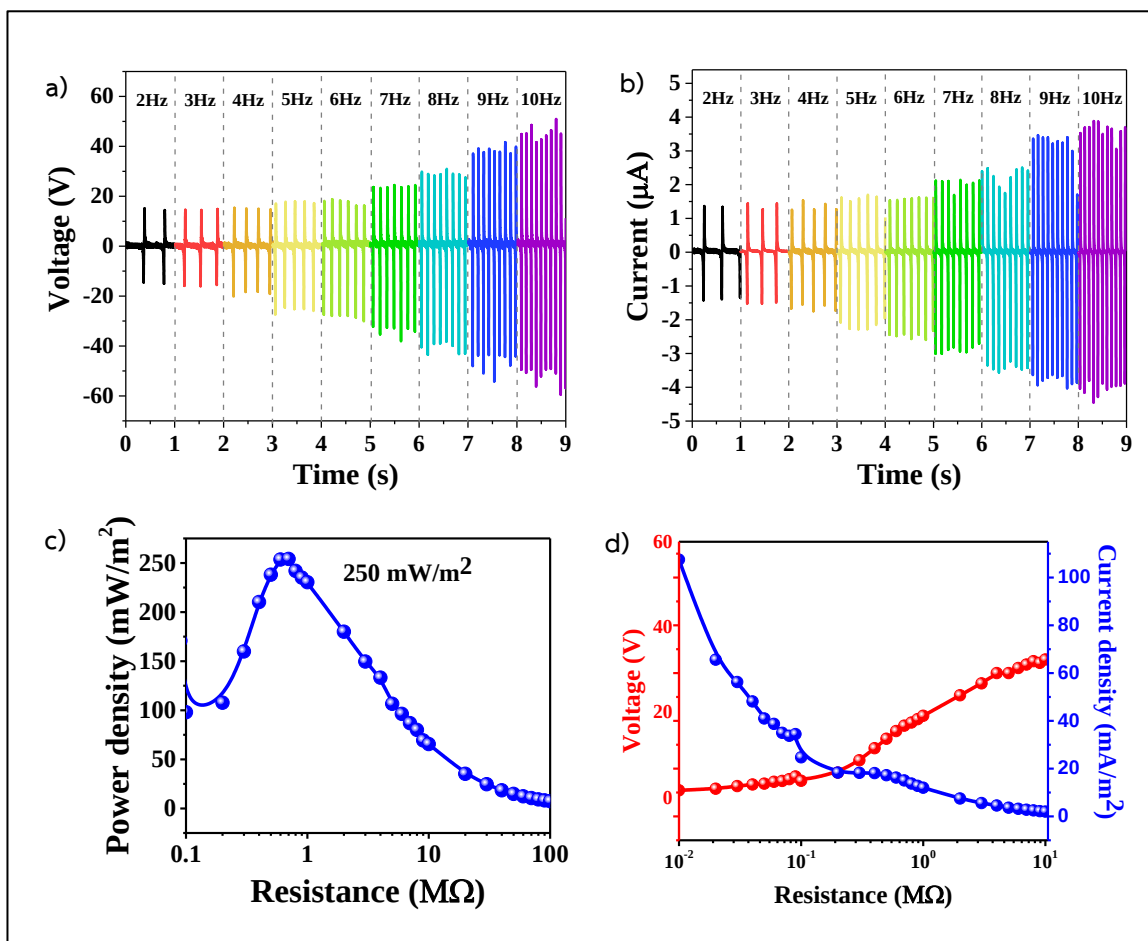
รูปที่ 1 a) รูปถ่ายลักษณะของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ b) แผนภาพการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า

นาโนแบบทริโบอิเล็กทริกยางธรรมชาติ ผลลัพธ์ทางไฟฟ้า c) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และ

d) กระแสไฟฟ้าวงจรปิด (I_{sc})

2. การศึกษาผลของความถี่ของแรงเชิงกลต่อผลลัพธ์ทางไฟฟ้า

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าโนแบบทริโบอิเล็กทริก คือความถี่ในการวัดจากการทดสอบค่าผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าโนแบบทริโบอิเล็กทริกที่ประดิษฐ์จากวัสดุฟิล์มยางธรรมชาติ พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และ กระแสไฟฟ้าวงจรปิด (I_{sc}) ที่ทดสอบโดยการทดสอบที่ความถี่จาก 2 ถึง 10 รอบต่อวินาที พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และ กระแสไฟฟ้าวงจรปิด (I_{sc}) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความถี่เพิ่มมากขึ้น โดยที่ความถี่ 10 รอบต่อวินาที มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดสูงถึง 102 โวลต์ และค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิดสูงถึง 8.3 ไมโครแอมแปร์ ตามลำดับ เนื่องจากการสัมผัสเชิงกลของคู่วัสดุทริโบอิเล็กทริกแปรผันตรงกับความเร็วในการวัด เมื่อเพิ่มความถี่ในการวัดสูงขึ้น การเหนี่ยวนำให้มีการสะสมประจุที่ผิวหน้าของวัสดุจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าผลลัพธ์ทางไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น แสดงผลดังกราฟในรูปที่ 2a) และ 2b)

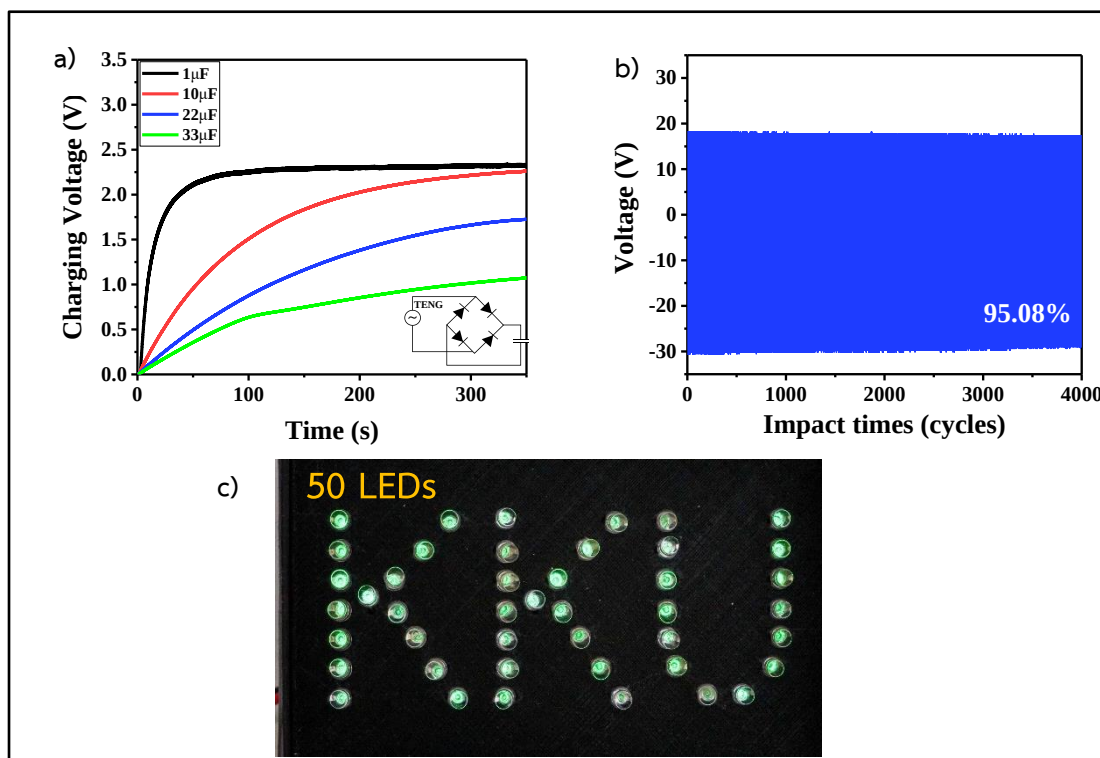


รูปที่ 2 a) และ b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และกระแสไฟฟ้าวงจรปิด (I_{sc}) ที่ขึ้นกับค่าความถี่ ตามลำดับ c) ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ และ d) ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าที่ขึ้นกับตัวต้านทานขนาด 1-100 MΩ

3. การศึกษาผลของโหลดตัวต้านทานต่อความหนาแน่นกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทรีโบอิเล็กทริกที่ประดิษฐ์จากวัสดุฟิล์มยางธรรมชาติ โดยทำการหาค่าความหนาแน่นกำลังงานสูงสุด เมื่อทำการวัดความต่างศักย์และกระแสของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนที่ต่อเข้ากับตัวต้านทานโหลดขนาด 1 ถึง 100 เมกะโอห์ม ที่ความถี่ 5 รอบต่อวินาที พบว่าที่ตัวต้านทานขนาด 1 เมกะโอห์ม แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทรีโบอิเล็กทริกที่ประดิษฐ์จากวัสดุฟิล์มยางธรรมชาตินี้สามารถให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ถึง 250 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2c) และ 2d)

การศึกษาความสามารถในการชาร์จประจุไฟฟ้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทรีโบอิเล็กทริกยางธรรมชาตินี้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าและชาร์จเข้าเก็บในตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้ โดยผลการทดสอบการทดลองชาร์จความต่างศักย์ไฟฟ้าให้แก่ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ที่ขนาดต่างๆ คือ 1, 10, 22 และ ขนาด 33 ไมโครฟารัด แสดงดังในรูปที่ 3a) พบว่าตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ที่สุดที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทรีโบอิเล็กทริกยางธรรมชาตินี้ สามารถชาร์จได้คือ ขนาด 33 ไมโครฟารัด โดยสามารถชาร์จความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ถึง 1 โวลต์ ภายในเวลา 300 วินาที นอกจากนี้ การศึกษาประสิทธิภาพความคงทน (Stability) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทรีโบอิเล็กทริกยางธรรมชาตินี้ ที่การทำงาน 4,000 รอบ พบว่ามีประสิทธิภาพความคงทนสูงถึง 95.08 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติความยืดหยุ่นที่ดี ทำให้สามารถรับแรงกระแทกได้สูง ไม่เกิดความเสียหายต่อวัสดุ ซึ่งเป็นข้อดีของยางธรรมชาติ และเมื่อต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทรีโบอิเล็กทริกที่ประดิษฐ์ขึ้นจากยางธรรมชาตินี้เข้ากับหลอดไฟ LEDs พบว่าสามารถทำให้หลอดไฟ LEDs สว่างได้สูงถึง 50 หลอด ดังแสดงในรูปที่ 3c)



รูปที่ 3 a) ผลการวัดตัวเก็บประจุที่ขนาดต่างกัน b) ผลการวัดประสิทธิภาพความคงทนของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทรีโบอิเล็กทริก c) รูปภาพแสดงการติดไฟของหลอด LEDs 50 หลอด

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การศึกษาการนำวัสดุยางธรรมชาติมาประดิษฐ์เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกเป็นครั้งแรก พบว่าประสบความสำเร็จในการศึกษาเป็นอย่างมาก จากผลการศึกษาการประดิษฐ์เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกจากแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติขนาด 4x4 ตารางเซนติเมตรพบว่าสามารถให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดสูงสุดอยู่ที่ 48.8 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิดสูงสุด 4.42 ไมโครแอมแปร์ ผลของการศึกษาผลลัพธ์ทางไฟฟ้าต่อรอบความถี่ที่ 2 ถึง 10 รอบต่อวินาที มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดสูงถึง 102 โวลต์ กระแสไฟฟ้าวงจรปิด 8.3 ไมโครแอมแปร์ ที่ความถี่สูงสุด 10 รอบต่อวินาที และผลของโหลดตัวต้านทานต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 5 รอบต่อวินาที พบว่าที่ขนาดตัวต้านทาน 1 เมกะโอห์ม ให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงถึง 250 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร นอกจากนี้ผลของการทดสอบประสิทธิภาพความเสถียรของผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกที่ประดิษฐ์จากยางธรรมชาตินี้ สูงถึง 95.08 เปอร์เซ็นต์ ที่การทำงาน 4,000 รอบ และสามารถทำให้หลอด LEDs จำนวน 50 ดวง สว่างได้ นับเป็นศักยภาพที่ดีเยี่ยมสำหรับการพัฒนาแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริกจากยางธรรมชาติและเป็นแนวทางที่ดีในการพัฒนาต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนเครือข่ายวิจัยและพัฒนาด้านนาโนเทคโนโลยีนาโนเทคโนโลยี-มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่มอบทุนการศึกษา ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนการใช้เครื่องมือในการทำงานวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ ผศ.ดร. วียะดา กาญจนะ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิจัยเป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆ ในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

พลดิพงษ์ พันธมนัสโสภา. (2557). ความคงทนและสมบัติของเส้นใยปอกระเจาที่ปรับปรุงผิวผสมในวัสดุยางคอมโพสิต.

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

Jing Q, Kar-Narayan S. Nanostructured polymer-based piezoelectric and triboelectric materials and devices for energy harvesting applications. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2018; 51(30): 303001.

Mishra S, Unnikrishnan L, Nayak S. K, Mohanty S. Advances in Piezoelectric Polymer Composites for Energy Harvesting Applications: A Systematic Review. *Macromolecular Materials and Engineering* 2018; 304(1): 1800463.

Putson C. Harvesting on Ambient Mechanical Energy with Smart Polymers. *Burapha Sci* 2012; 17(2): 182-188.

Tang X, Wang X, Cattley R, Gu F, Ball AD. Energy Harvesting Technologies for Achieving Self-Powered Wireless Sensor Networks in Machine Condition Monitoring: A Review. *Sensors*. 2018; 18(12):4113.

Wu C, Wang A. C, Ding W, Guo H, Wang Z. L. Triboelectric Nanogenerator: A Foundation of the Energy for the New Era. *Advanced Energy Materials* 2019; 9(1): 1802906.

Yang W, Wang X, Li H, Wu J, Hu Y. Comprehensive contact analysis for vertical-contact-mode triboelectric nanogenerators with micro-/nano-textured surfaces. *Nano Energy* 2018; 51: 241-249.