

การสังเคราะห์วัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ-ซีเมนต์สำหรับใช้เป็นวัสดุทริโบอิเล็กทริก เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกล

Synthesis of Natural Rubber-cement Composite as a Triboelectric Material for Mechanical Energy Harvesting

วิฑูรย์ ทองทัฬหทัย (Wittawat Thongthapthai)* ดร.วิยะดา หาญชนะ (Dr.Viyada Harnchana)**

ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง (Dr.Vittaya Amomkitbamrung)*** ดร.ปริญญญา จินดาประเสริฐ (Dr.Prinya Chindaprasit) ****

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ-ซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุทริโบอิเล็กทริกสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกล ด้วยการใช้น้ำสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุเป็นวัสดุประสานสำหรับการผสมกันของน้ำยางธรรมชาติกับวัสดุซีเมนต์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมพอสิต โดยศึกษาผลของอัตราส่วนสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุต่อน้ำยางธรรมชาติต่อวัสดุซีเมนต์ (Surfactant : NR : C) ที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพ ผลลัพธ์ทางไฟฟ้า กำลังรับแรงอัด และความหนาแน่นรวมของวัสดุคอมพอสิต ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของ Surfactant : NR : C ที่ 8: 25: 1 สามารถทำให้วัสดุคอมพอสิตขึ้นรูปได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงกว่าวัสดุซีเมนต์ปกติ 2 เท่า และวัสดุคอมพอสิตตามอัตราส่วนนี้มีความหนาแน่นรวม 1.12 g /cm³ มีกำลังรับแรงอัด 8.09 MPa ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่นำไปใช้งานจริงได้

ABSTRACT

Natural rubber-cement composite materials are fabricated and used as triboelectric materials for harvesting mechanical energy. The cement material is mixed to natural rubber latex by the use of nonionic surfactant as a coupling agent, in order to improve the physical property of composite materials. The effects of the surfactant: NR: C ratios on the composite physical properties, energy conversion performance, compressive strength and total density of composite materials are investigated. It was found that the composite with surfactant: NR: C ratio of 8: 25: 1 can successfully form composite materials and can generate electrical output higher than ordinary cement material up to two times. The composites also possess total density of 1.12 g /cm³ and can carry compressive strength up to 8.09 MPa, which is a standard value for practical use.

คำสำคัญ: ทริโบอิเล็กทริก วัสดุซีเมนต์ ยางธรรมชาติ

Keywords: Triboelectric, Cement material, Natural rubber

*นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

***รองศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

****ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

การเปลี่ยนพลังงานเชิงกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากพลังงานเชิงกลพบโดยทั่วไปในธรรมชาติซึ่งมีอยู่ในหลากหลายรูปแบบ อาทิ เช่น การเดิน-วิ่งของมนุษย์ การเคลื่อนที่ของยานพาหนะ การไหลของกระแส น้ำ การพัดพาของลม เป็นต้น ทั้งหมดนี้ล้วนเป็นแหล่งพลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นและมีอยู่อย่างไม่สิ้นสุด แต่กลับไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ กลับสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทริโบอิเล็กทริก (triboelectric nanogenerator; TENG) เป็นเทคโนโลยีใหม่ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 2012 โดย Prof. Zhong Lin Wang (Fan *et al.*, 2012) สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการเคลื่อนไหวยเชิงกลในรูปแบบต่างๆ โดยอาศัยหลักการอิเล็กทริฟิเคชัน (electrification) และการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (electrostatic induction) (Niu *et al.*, 2013) ด้วยจุดเด่นของวัสดุที่ใช้มีความหลากหลาย รูปแบบการทำงานที่เรียบง่าย และประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าได้สูงถึง 500 W/m^2 (Shi *et al.*, 2019) โดยกลไกการทำงานของ TENG นั้นเกิดจากประจุไฟฟ้า (electric charge) ที่สร้างขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุผ่านการสัมผัสกัน และความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างการแยกกันของสองวัสดุทริโบอิเล็กทริก ประจุไฟฟ้าจะถูกถ่ายโอนระหว่างการแยกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในอิเล็กโทรดตัวนำเกิดกระแสไฟฟ้าสลับ ดังนั้นประสิทธิภาพการส่งออกกระแสไฟฟ้าขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของสองวัสดุทริโบอิเล็กทริก (Chen *et al.*, 2013, Yang *et al.*, 2014, Wen *et al.*, 2014b, Chen *et al.*, 2016)

โดยทั่วไปแล้ว TENG ส่วนมากใช้วัสดุประเภทพอลิเมอร์เนื่องจากความยืดหยุ่นของวัสดุโดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุพอลิเมอร์ชนิด polytetrafluoroethylene (PTFE), fluorinated ethylene propylene (FEP), และไนลอน แต่ด้วยวัสดุพอลิเมอร์มีความสามารถในการรับแรงทางเชิงกลต่ำทำให้เกิดการเสียรูปของวัสดุทริโบอิเล็กทริกระหว่างการรับแรงทางเชิงกล (Wen *et al.*, 2014a, Lu *et al.*, 2017) จึงมีการนำวัสดุประเภทที่ไม่ใช่วัสดุพอลิเมอร์ (non-polymer) มาใช้เป็นวัสดุทริโบอิเล็กทริก (Lin *et al.*, 2013, Khatib & Bayomy, 1999) เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงทางเชิงกลสูง ซึ่งผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของวัสดุกลุ่มนี้มีค่าที่ต่ำกว่าวัสดุพอลิเมอร์โดยอาจเป็นผลจากความสามารถในการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตที่ต่ำกว่าวัสดุประเภทพอลิเมอร์เนื่องจากการสัมผัสพื้นผิวระหว่างวัสดุทริโบอิเล็กทริกที่ไม่สมบูรณ์ ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการปรับปรุงวัสดุทริโบอิเล็กทริกให้มีคุณสมบัติที่แข็งแรง ทนทาน เพิ่มความสมบูรณ์ของพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุทริโบอิเล็กทริก และสามารถขยายขนาดให้มีพื้นที่ในระดับที่ใหญ่ขึ้นเพื่อรองรับพลังงานเชิงกลที่มากขึ้น

วัสดุซีเมนต์ (cement materials) จึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างพื้นฐานในการก่อสร้างอาคารและทางเดิน ซึ่งจะเห็นว่าโครงสร้างพื้นฐานเหล่านี้เป็นบริเวณที่รองรับพลังงานเชิงกลโดยตรง และมีความแข็งแรงที่สามารถรองรับแรงทางเชิงกลได้สูง และมีต้นทุนที่ค่อนข้างต่ำเหมาะที่จะใช้งานในระดับที่ใหญ่ขึ้นและสามารถนำมาพัฒนาใช้งานได้จริง วัสดุซีเมนต์จัดเป็นวัสดุประเภทเซรามิก ที่ทนต่อแรงอัด (compressive strength) ได้สูง แต่ทนต่อแรงดึงและแรงดัด (tensile, flexural strength) ได้ต่ำ อย่างไรก็ตามเนื่องจากความเป็นวัสดุแข็งเกร็งซึ่งส่งผลให้การสัมผัสกันของสองวัสดุทริโบอิเล็กทริกเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ต่างจากวัสดุประเภทพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นดังที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้ การสังเคราะห์วัสดุคอมพอสิตระหว่างวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นและวัสดุซีเมนต์จึงเป็นแนวทางที่สามารถนำไปสู่การเพิ่มกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าของ TENG ได้ ทั้งนี้ได้มีการรายงานการสังเคราะห์วัสดุคอมพอสิตยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว (Khatib & Bayomy, 1999) และกลุ่มยางสังเคราะห์เช่น styrene-butadiene rubber (SBR), ethylene-vinyl acetate (EVA) (Grinys *et al.*, 2020, Khan *et al.*, 2020, Wang *et al.*, 2005, Zhong *et al.*, 2002, Zhong & Chen, 2002, Mirza *et al.*, 2002) ในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตเช่น ความเหนียว แรงดัด และความทนทาน แต่เนื่องจากกลุ่มของยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว หรือยางสังเคราะห์เหล่านี้มีกระบวนการการได้มาก่อนนำมาผสมกับคอนกรีตค่อนข้างยุ่งยาก ซับซ้อน ดังนั้นน้ำยางธรรมชาติ (natural rubber latex; NR latex) จัดเป็นวัสดุ

elastomeric polymer latex ที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และยังยืนเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพอลิเมอร์สังเคราะห์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาวัสดุซีเมนต์มาผสมกับน้ำยางธรรมชาติเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุทรีโบอิเล็กทริกสำหรับการประดิษฐ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทรีโบอิเล็กทริก แต่ด้วยธรรมชาติแล้ววัสดุทั้งสองนี้ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (nonionic surfactant) คือ C-10-guerbet alcohol alkoxylate เป็นวัสดุช่วยเชื่อมประสานระหว่างน้ำยางธรรมชาติและวัสดุซีเมนต์ เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวกลุ่มนี้พบการใช้งานในการผสมระหว่างวัสดุซีเมนต์กับวัสดุพอลิเมอร์ (KHAMPUT & SUWEERO, 2014) และถูกนำเสนอว่าเป็นกลุ่มของสารลดแรงตึงผิวที่มีอัตราการเกิดฟองอากาศต่ำ (Lindgren & Sjöström, 1994) จึงเป็นกระบวนการสังเคราะห์วัสดุทรีโบอิเล็กทริกที่น่าสนใจทั้งด้านราคาต้นทุนการผลิตต่ำ และด้านการพัฒนาโครงสร้างพื้นผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลที่จะสามารถช่วยให้ได้ประสิทธิภาพกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้น

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. สังเคราะห์วัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ-ซีเมนต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุทรีโบอิเล็กทริกสำหรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบทรีโบอิเล็กทริก โดยศึกษาอัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุต่อน้ำยางธรรมชาติต่อวัสดุซีเมนต์ ที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพของวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ-ซีเมนต์
2. ศึกษาเงื่อนไขการทำงานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนทรีโบอิเล็กทริกจากวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ-ซีเมนต์ ที่สามารถให้ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าสูง และศึกษาสมบัติกำลังอัดของวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ-ซีเมนต์

วิธีการวิจัย

1. การสังเคราะห์วัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ-ซีเมนต์

การผสมวัสดุซีเมนต์ (ผงซีเมนต์) กับน้ำยางธรรมชาติ ทำได้โดยการนำน้ำยางธรรมชาติ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ และน้ำ ตามส่วนผสมที่แสดงในตารางที่ 1 มาปั่นกวนในภาชนะบีกเกอร์ใช้เวลา 2 นาที เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฟองอากาศ หลังจากนั้นนำมาผสมกับวัสดุซีเมนต์ที่อุณหภูมิห้องด้วยมือเป็นเวลา 3 นาที โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและการแข็งตัวของวัสดุคอมพอสิต ซึ่งพบว่าเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการหล่อลงในแม่พิมพ์ แล้วนำไปบ่มในห้องอุณหภูมิอากาศ ที่ 25 °C ที่ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 60% เป็นเวลา 7 วัน โดยขนาดของแม่พิมพ์มีขนาดเท่ากับ 4 x 4 x 1 cm³ มีพื้นที่ผิวสัมผัส 4 x 4 cm² และความหนา 1 cm โดยใช้แผ่นสแตนเลสขนาด 2 x 6.5 cm² และหนา 0.2 mm เป็นขั้วตัวนำไฟฟ้า โดยใช้ยางธรรมชาติจากบริษัท THAI RUBBER LATEX จำกัดมหาชน มีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 61.74 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ประกอบด้วยส่วนที่เป็นน้ำยาง 61.12 เปอร์เซ็นต์โดยมวล และส่วนที่ไม่ใช่น้ำยาง 1.62 เปอร์เซ็นต์โดยมวล และวัสดุซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 จากบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)

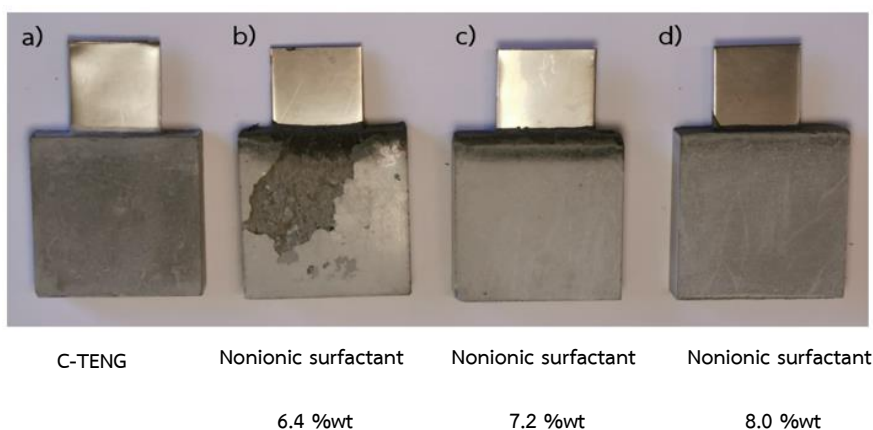
2. การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและสมบัติการรับแรงอัด

การทดสอบประสิทธิภาพกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้รูปแบบการสัมผัส-แยกในแนวตั้งและใช้อิเล็กโทรดเดี่ยว (single electrode vertical contact-separation) เพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของ การติดตั้งประกอบด้วยวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ-ซีเมนต์ อยู่ด้านล่างและเทฟลอน (PTFE) อยู่ด้านบน โดยมีขนาด 4 x 4 cm² ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{OC}) กระแสไฟฟ้า (I_{SC}) และแรงอัด (compressive strength) ถูกตรวจสอบโดยใช้ฮอสซิลโลสโคป (Tektronix DPO2002B) แอมป์มิเตอร์แบบดิจิตอล (Kiethley DMM6500) และเครื่องวัดแรงอัดในแนวตั้งตามลำดับ

ผลการวิจัย

1. การศึกษาอัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุต่อน้ำยางธรรมชาติต่อวัสดุซีเมนต์

เมื่อทำการศึกษาอัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุต่อน้ำยางธรรมชาติต่อวัสดุซีเมนต์ ที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพของวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ-ซีเมนต์ (วัสดุคอมพอสิต) พบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุเป็นวัสดุประสานระหว่างน้ำยางธรรมชาติกับวัสดุซีเมนต์ เมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณ 6.4-8.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์ (9wt) ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่ทำให้วัสดุคอมพอสิตสามารถขึ้นรูปได้ และทำการศึกษาปริมาณน้ำยางธรรมชาติเป็น 5-25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์ โดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุซีเมนต์ (W : C) เท่ากับ 0.4 : 1 สามารถขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตได้ดังรูปที่ 1 และแสดงส่วนผสมในตารางที่ 1



รูปที่ 1 ภาพถ่ายของวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ-ซีเมนต์ a.) ซีเมนต์ปกติ (C-TENG) b-d.) วัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ-ซีเมนต์ที่มีปริมาณสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ 6.4-8.0%wt ที่ปริมาณน้ำยางธรรมชาติคงที่ 25%wt

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุต่อน้ำยางธรรมชาติต่อวัสดุซีเมนต์

สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์)	ปริมาณน้ำยางธรรมชาติ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซีเมนต์)					ความสามารถในการขึ้นรูป วัสดุคอมพอสิต (7 วัน)
	5	10	15	20	25	
0	×	×	×	×	×	ไม่สามารถผสมเข้ากันได้
6.4	✓	✓	✓	×	×	ติดกับแม่พิมพ์อะคริลิก
7.2	✓	✓	✓	✓	×	ติดกับแม่พิมพ์อะคริลิก
8.0	✓	✓	✓	✓	✓	ขึ้นรูปได้สมบูรณ์

หมายเหตุ:

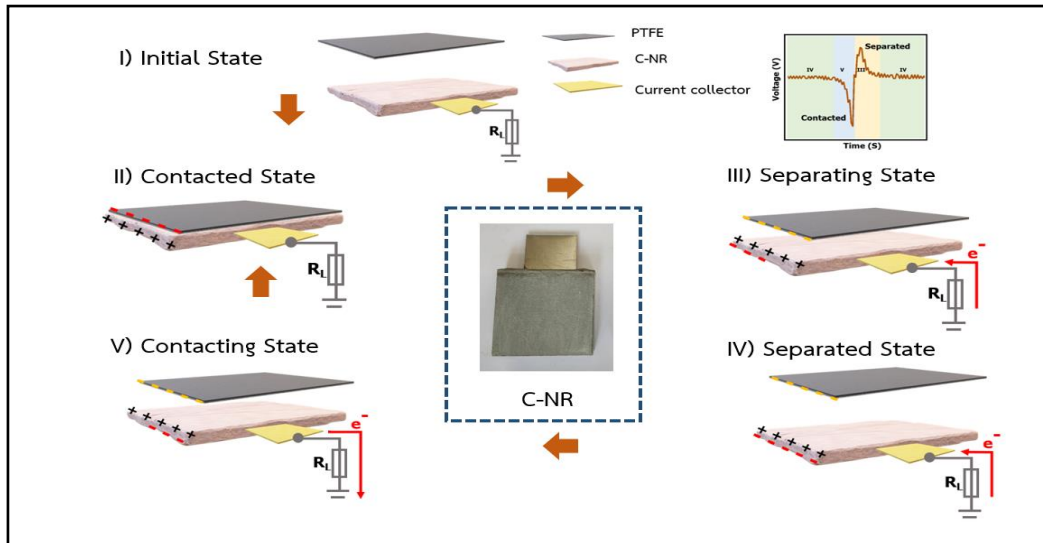
- ✓ สามารถผสมเข้ากันได้
- ×
- ไม่สามารถผสมเข้ากันได้

จากรูปที่ 1 และตารางที่ 1 จะเห็นว่าอัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุต่อน้ำยางธรรมชาติต่อวัสดุซีเมนต์ ที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพของวัสดุคอมพอสิตที่อัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ 6.4-7.2%wt พบว่าที่ปริมาณน้ำยางธรรมชาติมากขึ้นคือ 20%wt และ 25%wt สามารถขึ้นรูปได้แต่เกิดการแยกชั้นของวัสดุซีเมนต์และน้ำยางธรรมชาติอย่างชัดเจน อีกทั้งพบว่าผิวของวัสดุคอมพอสิตติดกับแม่พิมพ์ทำให้ผิวไม่เรียบ และลอกออกเป็นแผ่นแสดงดังรูปที่ 1b-1c) เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุต่อน้ำยางธรรมชาติต่อวัสดุซีเมนต์ไม่เหมาะสมส่งผลทำให้ที่ปริมาณน้ำยางธรรมชาติสูงกว่า 20%wt เกิดการแยกชั้น ดังนั้นเพื่อยืนยันความเป็นไปได้ของปริมาณสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพจะเห็นว่า ที่อัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ 8%wt สามารถช่วยผสมวัสดุซีเมนต์กับน้ำยางธรรมชาติเป็นเนื้อเดียวกันและมีลักษณะทางกายภาพได้อย่างสมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 1d) และพบว่าถ้าเพิ่มปริมาณของน้ำยางธรรมชาติมากกว่า 25%wt จะเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนและแยกกันไม่เป็นเนื้อเดียวกันในระหว่างการผสม ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับอัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ 6.4-7.2%wt ที่ปริมาณน้ำยางธรรมชาติ 20%wt และ 25%wt ดังได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาโดยเพิ่มปริมาณของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุมากกว่า 8%wt พบว่าวัสดุผสมมีลักษณะที่เหลวมากขึ้น ทำให้ไม่แข็งตัวหลังจากการบ่มไว้เป็นระยะเวลา 7 วัน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะถูกยับยั้งซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้รายงานผลของการชะลอตัวหรือการถูกยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจากสารลดแรงตึงผิวในวัสดุคอมพอสิตที่มีพอลิเมอร์และวัสดุซีเมนต์ (Singh & Rai, 2001)

หลังจากนี้วัสดุซีเมนต์ปกติ (ไม่มีการผสมน้ำยางธรรมชาติและสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ) จะถูกกำหนดให้เป็น C-L และวัสดุคอมพอสิตที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์จะถูกกำหนดให้เป็น วัสดุคอมพอสิต (C-L-NR) เช่น วัสดุคอมพอสิตที่มีการสังเคราะห์โดยผสมน้ำยางธรรมชาติ 25%wt จะเขียนเป็น C-L-NR 25%wt

2. การศึกษากำล้างการผลิตพลังงานไฟฟ้าของ TENG ที่ใช้วัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ-ซีเมนต์

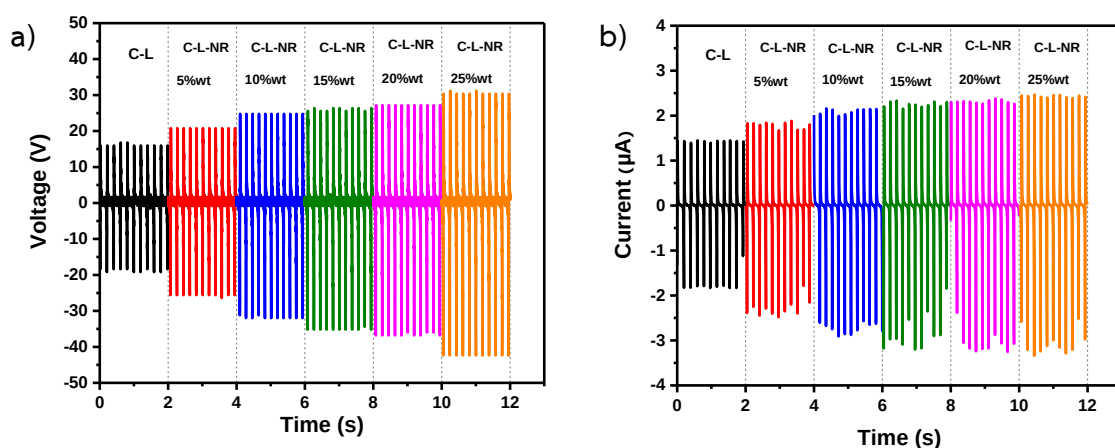
เมื่อทำการศึกษากำล้างวัสดุคอมพอสิต ด้วยการใช้สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุเป็นวัสดุประสานระหว่างน้ำยางธรรมชาติกับวัสดุซีเมนต์ เมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณคงที่ 8%wt ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่ทำให้วัสดุคอมพอสิตสามารถขึ้นรูปได้ และทำการศึกษาน้ำยางธรรมชาติเป็น 5-25%wt การทดสอบประสิทธิภาพกำล้างการผลิตพลังงานไฟฟ้าของ TENG จำเป็นต้องอาศัยวัสดุทรีโบอิเล็กทริกวัสดุเพลตอน (PTFE) ซึ่งเป็นวัสดุทรีโบอิเล็กทริกขั้วลบ และเป็นวัสดุทรีโบอิเล็กทริกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวัสดุซีเมนต์ซึ่งมีขั้วทรีโบอิเล็กทริกเป็นบวก (Sintusiri *et al.*, 2020) สำหรับกลไกการทำงานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบทรีโบอิเล็กทริก แสดงไว้ในรูปที่ 2) เมื่อพื้นผิวของวัสดุคอมพอสิตสัมผัสยังไม่สัมผัสกับ PTFE ดังสถานะ (I) จะไม่เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนขึ้น และเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวทั้งสอง ดังสถานะ (II) อิเล็กตรอนจะถ่ายเทจากวัสดุคอมพอสิตไปยังพื้นผิวของ PTFE ทำให้เกิดการก่อตัวของประจุไฟฟ้า (electric charge) ที่เท่ากันและต่างกัน โดยประจุลบ (negative charge) จะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของ PTFE ในขณะที่ประจุบวก (positive charge) จะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของวัสดุคอมพอสิต เนื่องจากปรากฏการณ์คอนแทกอิเล็กทริกไคเซน ในขณะที่พื้นผิวของวัสดุคอมพอสิตและ PTFE เริ่มแยกออกจากกัน ดังสถานะ (III และ IV) ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าต่างกันบนพื้นผิวของวัสดุคอมพอสิตและ PTFE ส่งผลให้อิเล็กตรอนไหลจากดิน (กราวด์) ไปยังอิเล็กโทรดทำให้เกิดสัญญาณกระแสไฟฟ้าบวก และเมื่อพื้นผิวของวัสดุคอมพอสิตและ PTFE กลับมาสัมผัสกันอีกครั้งดังสถานะ (V) อิเล็กตรอนจะไหลกลับสู่กราวด์เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าลบ เป็นกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าของ TENG โดยใช้วัสดุคอมพอสิตและ PTFE เป็นคู่ทรีโบอิเล็กทริก



การศึกษาลัทธิทางไฟฟ้าของ TENG ที่ใช้วัสดุคอมพอสิตจากการผสมน้ำยางธรรมชาติกับวัสดุซีเมนต์ โดยการตรวจสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{OC}) และกระแสไฟฟ้า (I_{SC}) จะมีค่าดังนี้ (Niu et al., 2013)

$$V_{OC} = \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0}$$

เมื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{OC}) และกระแสไฟฟ้า (I_{SC}) พบว่า ค่า V_{OC} สูงสุดได้จากการเพิ่มปริมาณน้ำยางธรรมชาติสูงสุดที่ C-L-NR 25%wt สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ถึง 74.0 V และมีค่าสูงสุดสอดคล้องกันกับ I_{SC} โดยสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 5.52 μA ดังแสดงภาพที่ 3ก) และ 3ข) และตารางที่ 2 ตามลำดับ



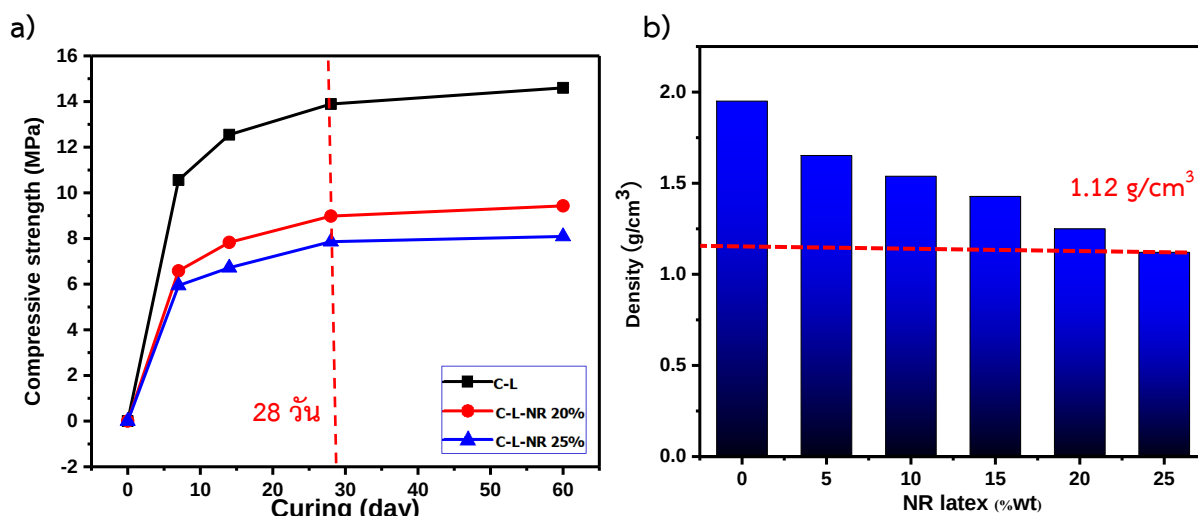
รูปที่ 3 a.) ความต่างศักย์ไฟฟ้า b.) กระแสไฟฟ้า ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าโนแบบทริโบอิเล็กทริกจากวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ-ซีเมนต์ที่ปริมาณน้ำยางธรรมชาติ 5-25%wt

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุต่อน้ำยางธรรมชาติต่อวัสดุซีเมนต์ และประสิทธิภาพกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบทริโบอิเล็กทริก

ตัวอย่าง	ส่วนประกอบ			ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า	
	น้ำ : ซีเมนต์ (W : C)	สารลดแรงตึงผิว ไม่มีประจุ (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักของซีเมนต์)	น้ำยางธรรมชาติ (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักของ ซีเมนต์)	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (ไมโครแอมป์)
C-L	0.5: 1	-	-	36.0	3.07
C-L-NR 5%wt	0.4: 1	8	5	47.2	4.43
C-L-NR 10%wt	0.4: 1	8	10	57.6	4.50
C-L-NR 15%wt	0.4: 1	8	15	61.6	5.18
C-L-NR 20%wt	0.4: 1	8	20	64.8	5.20
C-L-NR 25%wt	0.4: 1	8	25	74.0	5.52

3. การศึกษาสมบัติกำลังอัด

เมื่อทำการศึกษากำลังอัด (compressive strength) ของวัสดุซีเมนต์ (C-L) และวัสดุคอมพอสิต (C-L-NR) แสดงโดยการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่อัตราส่วนของ C-L-NR 20%wt และ C-L-NR 25%wt เปรียบเทียบกับ C-L พบว่า กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มจนถึงอายุการบ่ม 28 วัน หลังจากนั้นพบว่าค่ากำลังอัดของ C-L-NR 20%wt , C-L-NR 25% wt และ C-L จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงอายุการบ่ม 60 วัน ซึ่งผลมีความสอดคล้องกับงานวิจัย Ohama และ Kan (Saurenbach *et al.*, 1992) รายงานว่ากำลังอัดของทั้งยางสไตรีน - บิวทาไดอีน (SBR) และ เอทิลีน - ไวนิลอะซิเตท (EVA) จะมีการพัฒนาไปจนถึงอายุการบ่มเป็นเวลา 28 วัน และหลังจากนั้นการพัฒนาจะเกือบคงที่จนถึงอายุ 182 วัน สิ่งนี้บ่งชี้ให้เห็นว่าการมีอยู่ของน้ำยางธรรมชาติจะช่วยพัฒนากำลังอัดในระยะยาว ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่มีต่อค่ากำลังอัดที่บ่มเป็นเวลา 28 วัน กำลังอัดของ C-L-NR 20%wt และ C-L-NR 25%wt ลดลงตามปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่เพิ่มมากขึ้น การลดลงของกำลังอัดนี้เกิดเนื่องจากการมีส่วนผสมน้ำยางธรรมชาติและโพรงอากาศที่เพิ่มขึ้น จากการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุจะทำให้เกิดโพรงอากาศขณะผสมวัสดุคอมพอสิต ทำให้การผสมน้ำยางธรรมชาติในปริมาณ 20%wt และ 25%wt ลงในวัสดุซีเมนต์มีกำลังอัดต่ำกว่า 9.43 และ 8.09 MPa ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4a)



รูปที่ 4 a) ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (compressive strength) ของ C-L, C-L-NR 20%wt และ C-L-NR 25%wt ทดสอบที่อายุการบ่ม 7-60 วันตามลำดับ b) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของส่วนผสมและความหนาแน่นรวมของวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ-ซีเมนต์ที่มีปริมาตร $4 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ และมีพื้นที่ $4 \times 4 \text{ cm}^2$

แต่อย่างไรก็ตาม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย (มอก. 2601-2556) กำหนดค่าแรงอัดอายุการบ่ม 28 วันของวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติต้องมีค่ามากกว่า 5 MPa สำหรับวัสดุที่มีความหนาแน่นระหว่าง 1.01 g/cm^3 ถึง 1.20 g/cm^3 ซึ่งอัตราส่วนผสมของ C-L-NR 25% wt มีความหนาแน่น 1.12 g/cm^3 ตรงตามข้อกำหนดนี้ดังแสดงในรูปที่ 4b) ดังนั้นการผสมกันของวัสดุซีเมนต์ และน้ำยางธรรมชาติโดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ สามารถใช้ในการพัฒนาพื้นผิวของวัสดุซีเมนต์ และสามารถทนทานต่อแรงเชิงกลได้สูง

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบทริโบอิเล็กทริกจากวัสดุคอมพอสิต ประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรกโดยการผสมวัสดุซีเมนต์กับน้ำยางธรรมชาติ และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ ซึ่งได้มีการศึกษาอัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุต่อน้ำยางธรรมชาติต่อวัสดุซีเมนต์ ที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพ ผลลัพธ์ทางไฟฟ้า กำลังรับแรงอัด และความหนาแน่นโดยรวมของวัสดุคอมพอสิต

พบว่าการผสมน้ำยางธรรมชาติกับวัสดุซีเมนต์ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นจาก 5-25%wt ในปริมาณสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุคงที่ 8%wt สามารถสังเคราะห์เป็นวัสดุคอมพอสิตที่สามารถใช้ในการแปลงพลังงานเชิงกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่อัตราส่วน C-L-NR 25%wt สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่า C-L ประมาณ 2 เท่า เนื่องจากวัสดุคอมพอสิตลักษณะโครงสร้างเฉพาะที่เหมาะสมกับวัสดุเทฟลอนนำไปสู่การแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำยางธรรมชาติสามารถนำไปพัฒนาเป็นซีเมนต์เพสต์ที่มีน้ำหนักเบา เนื่องจากความหนาแน่นโดยรวมของวัสดุคอมพอสิตมีค่าลดลงตามปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น นำไปสู่การพัฒนาเป็นวัสดุคอมพอสิตสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลขนาดใหญ่ที่ทนทานต่อแรงกระแทกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. วิยะดา หาญเงิน และคณะกลุ่มผู้วิจัย (Nanogen LAB) คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ และสาขาวิชา วัสดุศาสตร์และเทคโนโลยี และห้องปฏิบัติการวิเคราะห์แรงอัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ตลอดจนทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย (ทุนเรียนดีวิทย์) ที่สนับสนุนและการช่วยเหลือในทุกด้านด้วยดีเสมอมา

เอกสารอ้างอิง

- Chen, J., H. Guo, X. He, G. Liu, Y. Xi, H. Shi and C. Hu, 2016: Enhancing Performance of Triboelectric Nanogenerator by Filling High Dielectric Nanoparticles into Sponge PDMS Film. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8, 736-744.
- Chen, J., G. Zhu, W. Yang, Q. Jing, P. Bai, Y. Yang, T.-C. Hou and Z. L. Wang, 2013: Harmonic-Resonator-Based Triboelectric Nanogenerator as a Sustainable Power Source and a Self-Powered Active Vibration Sensor. *Advanced Materials*, 25, 6094-6099.
- Fan, F.-R., Z.-Q. Tian and Z. Lin Wang, 2012: Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 1, 328-334.
- Grinys, A., A. Augonis, M. Dauksys and D. Pupeikis, 2020: Mechanical properties and durability of rubberized and SBR latex modified rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 248, 118584.
- KHAMPUT, P. and K. SUWEERO, 2014: Using of Para-rubber to Develop Properties of Concrete Block Mixed with Ethylene Vinyl Acetate Plastic in Masonry. *Perceptions of Rural Tourism Development Potential in South-Eastern Bosnia Hamid El Bilali, Aleksandra Despotovic, Adriana Radosavac, Sinisa Berjan, Aziz Abouabdillah, Tamara Rodic and Dusan Petrovic*, 86.
- Khan, A. N., N. Bheel, M. Ahmed, R. A. Abbasi and S. Sohu, 2020: Use of styrene butadiene rubber (SBR) polymer in cement concrete. *Indian Journal of Science and Technology*, 13, 606-616.
- Khatib, Z. K. and F. M. Bayomy, 1999: Rubberized Portland cement concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 11, 206-213.
- Lin, Z.-H., Y. Xie, Y. Yang, S. Wang, G. Zhu and Z. L. Wang, 2013: Enhanced triboelectric nanogenerators and triboelectric nanosensor using chemically modified TiO₂ nanomaterials. *ACS nano*, 7, 4554-4560.
- Lindgren, Å. and M. Sjöström, 1994: Multivariate physicochemical characterization of some technical non-ionic surfactants. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 23, 179-189.
- Lu, C. X., C. B. Han, G. Q. Gu, J. Chen, Z. W. Yang, T. Jiang, C. He and Z. L. Wang, 2017: Temperature effect on performance of triboelectric nanogenerator. *Advanced Engineering Materials*, 19, 1700275.
- Mirza, J., M. S. Mirza and R. Lapointe, 2002: Laboratory and field performance of polymer-modified cement-based repair mortars in cold climates. *Construction and Building Materials*, 16, 365-374.

- Niu, S., S. Wang, L. Lin, Y. Liu, Y. S. Zhou, Y. Hu and Z. L. Wang, 2013: Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source. *Energy & Environmental Science*, 6, 3576-3583.
- Saurenbach, F., D. Wollmann, B. Terris and A. Diaz, 1992: Force microscopy of ion-containing polymer surfaces: morphology and charge structure. *Langmuir*, 8, 1199-1203.
- Shi, Q., T. He and C. Lee, 2019: More than energy harvesting – Combining triboelectric nanogenerator and flexible electronics technology for enabling novel micro-/nano-systems. *Nano Energy*, 57, 851-871.
- Singh, N. B. and S. Rai, 2001: Effect of polyvinyl alcohol on the hydration of cement with rice husk ash. *Cement and Concrete Research*, 31, 239-243.
- Sintusiri, J., V. Harnchana, V. Amornkitbamrung, A. Wongsas and P. Chindaprasit, 2020: Portland Cement-TiO₂ triboelectric nanogenerator for robust large-scale mechanical energy harvesting and instantaneous motion sensor applications. *Nano Energy*, 104802.
- Wang, R., P.-M. Wang and X.-G. Li, 2005: Physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber emulsion modified cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 35, 900-906.
- Wen, X., Y. Su, Y. Yang, H. Zhang and Z. L. Wang, 2014a: Applicability of triboelectric generator over a wide range of temperature. *Nano Energy*, 4, 150-156.
- Wen, X., W. Yang, Q. Jing and Z. L. Wang, 2014b: Harvesting Broadband Kinetic Impact Energy from Mechanical Triggering/Vibration and Water Waves. *ACS Nano*, 8, 7405-7412.
- Yang, J., J. Chen, Y. Yang, H. Zhang, W. Yang, P. Bai, Y. Su and Z. L. Wang, 2014: Broadband Vibrational Energy Harvesting Based on a Triboelectric Nanogenerator. *Advanced Energy Materials*, 4, 1301322.
- Zhong, S. and Z. Chen, 2002: Properties of latex blends and its modified cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 32, 1515-1524.
- Zhong, S., M. Shi and Z. Chen, 2002: The AC response of polymer-coated mortar specimens. *Cement and Concrete Research*, 32, 983-987.