การศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้ผลเทอร์โมอิเล็กทริกต่อถนนคอนกรีต

A study of thermoelectric energy harvesting on concrete pavement

คฑาวุธ วิชัย[1] เขมิสรา ยอดประเสริฐ[2] จุฬาลักษณ์ ภิกขุวาโย[3] สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์[4] และ จินตหรา ลาวงศ์เกิด[5,*]

[1,2,3,4,5] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

**Corresponding author; E-mail address: ljintara@engr.tu.ac.th*

บทคัดย่อ

ปัญหาภาวะโลกร้อนเป็นผลมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลหรือพลังงานสิ้นเปลือง ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินกระจายไปทั่วทุกมุมโลก ดังนั้นการเลือกใช้พลังงานทางเลือกจึงเป็นแนวทางการแก้ไขปัญหา แม้ยังคงมีอุปสรรคทางด้านเทคนิคและการปฏิบัติในการใช้งานจริง ในการดำเนินการของพลังงานทางเลือก ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเก็บเกี่ยวพลังงานจากผลเทอร์โมอิเล็กทริกต่อโครงสร้างคอนกรีตในถนนและปรับปรุงประสิทธิภาพคอนกรีตในถนน เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านความร้อน ไฟฟ้า และกำลังรับแรงอัดจากการเพิ่มวัสดุผสมซีเมนต์ในคอนกรีต ได้แก่ กราไฟต์ โดยเตรียมตัวอย่างคอนกรีต และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของกราไฟต์ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1 และ 2.5 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ โดยจำลองสถานการณ์ในตอนกลางวันและตอนกลางคืนของคอนกรีต จากผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าการผสมเพิ่มกราไฟต์ในปริมาณร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ให้อุณหภูมิสูงสุดบริเวณด้านบน 45.9 องศาเซลเซียส จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากผลเทอร์โมอิเล็กทริกสูงสุด 0.25 V อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้จากด้านข้างมีผลที่แตกต่างกัน ตำแหน่งการติดตั้งตัวแปลงพลังงานมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้ ดังนั้นความลึกการติดตั้งตัวแปลงพลังงานไว้ใกล้เคียงบริเวณด้านบนคอนกรีตที่ได้รับความร้อนให้ได้มากที่สุด จึงสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เทอร์โมอิเล็กทริก, คอนกรีต, กราไฟต์

Abstract

Global warming is caused by the combustion of fossil fuels and energy waste, causing harm to life and property on a global scale. Therefore, alternative energy is a solution, despite the fact that there are still technical and practical obstacles to its practical implementation. The purpose of this paper was to study the energy harvesting behavior of the thermoelectric effect on concrete pavement and improve the performance of the concrete structures in roads that affect energy harvesting from the thermoelectric effect. To investigate and compare the thermal, electrical, and mechanical properties of adding graphite to concrete within 0.5%, 1%, and 2.5% by weight of cement, by simulate daytime and nighttime conditions on concrete pavement. The results indicated that graphite was added to the mixture in an amount of 2.5% by weight of cement and that the maximum temperature on the top surface was 45.9 °C; therefore, the maximum voltage obtained from the thermoelectric effect was 0.25 V. However, the result obtained on the side surface was lower than the top surface, which was in the same position. Installing a device to convert energy from the thermoelectric effect to voltage is important. Therefore, the installation depth of the thermoelectric device is close to the top surface, which is a concrete pavement that has been high-tempered and, therefore, is able to harvest energy effectively.

Keywords: Thermoelectric, Concrete, Graphite

1. บทนำ

พลังงานมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของประชากรทั่วโลก โดยจากทั้งพลังงานสิ้นเปลืองหรือพลังงานหมุนเวียน ซึ่งเป็นตัวเร่งการพัฒนาอย่างยั่งยืนและมีคุณภาพของประเทศ ดังนั้นการเข้าถึงพลังงานจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการเติบโตของประเทศ อย่างไรก็ตามสถานการณ์ปัจจุบันความต้องการในด้านพลังงานนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีปัจจัยจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและการพัฒนาอุตสาหกรรมและเศรษฐกิจที่ยังคงดำเนินต่อไปอย่างต่อเนื่อง สวนทางกับแหล่งกำเนิดพลังงานต่าง ๆ ที่มีแนวโน้มลดลง และกำลังจะหมดไปในอนาคต อย่างเชื้อเพลิงฟอสซิล อาทิ ถ่านหิน น้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งพลังงานเหล่านี้ล้วนเป็นพลังงานสิ้นเปลือง เมื่อเชื้อเพลิงเหล่านี้ถูกเผาไหม้ผ่านกิจกรรมต่าง ๆ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซเรือนกระจก ซึ่งคงค้างอยู่ในชั้นบรรยากาศโลก ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) [1] [2] “พลังงานทางเลือก” จึงเป็นหนึ่งในแนวทางการแก้ปัญหาได้ดี ไม่ว่าจะเป็นพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น ซึ่งพลังงานหมุนเวียนจากธรรมชาติเหล่านี้ควบคู่กับการนำเทคโนโลยีใหม่มาปรับใช้งาน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและช่วยลด

ผลกระทบ ลดมลภาวะ และมลพิษที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดีในระยะยาว [3] [4] [5] แต่ยังมีพลังงานทางเลือกอีกชนิดหนึ่งซึ่งกำลังได้รับความสนใจในการวิจัยและพัฒนาปรับปรุง นั่นคือ “เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric)” เป็นหลักการที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของจุดสองจุด กล่าวคือยิ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างจุดสองจุดเพิ่มขึ้น พลังงานที่ได้จากผลของเทอร์โมอิเล็กทริกก็จะเพิ่มขึ้น โดยในงานวิจัยที่ผ่านมานั้นได้มีการนำคอนกรีตมาทดสอบเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริก [6] อีกทั้งเติมสารตัวนำไฟฟ้าหลายชนิดส่งผลให้ความร้อนในคอนกรีตถนนเพิ่มขึ้นสำหรับเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำแข็งและหิมะในประเทศที่มีการอากาศหนาว [7] [8] ดังนั้นสำหรับประเทศไทยที่มีอากาศร้อนตลอดทั้งปีและมีปริมาณถนนคอนกรีตในความรับผิดชอบของกรมทางหลวง 2,337.708 กิโลเมตร จากข้อมูลในปี 2565 [9] จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำคอนกรีตที่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความร้อนมาใช้งานจริงในพื้นถนนที่ได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยตรงเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริกให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทำให้ประเทศไทยผลิตพลังงานทดแทนขึ้นมา เพื่อขับเคลื่อนเศรษฐกิจและยกระดับคุณภาพชีวิตในด้านการเข้าถึงแหล่งพลังงานของประชาชน

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การเก็บเกี่ยวพลังงานจากผลเทอร์โมอิเล็กทริกต่อโครงสร้างคอนกรีตในถนน โดยการปรับปรุงเพิ่มวัสดุผสมซีเมนต์อย่างกราไฟต์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการนำความร้อนในคอนกรีตเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริกให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 Thermoelectric

เทอร์โมอิเล็กทริก ถือเป็นเทคโนโลยีทางเลือกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยใช้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของจุดสองจุด ประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

2.2 Thermoelectric material and principle

ในปี ค.ศ.1821 โทมัส โยฮาน ซีเบ็ก (Thomas Johann Seebeck) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ได้ค้นพบว่าในโลหะหลายชนิด ความร้อนส่วนหนึ่งสามารถถ่ายเทโดยประจุไฟฟ้า ได้แก่ อิเล็กตรอนอิสระ (free electrons) ปรากฏการณ์นี้ต่อมาเรียกว่า ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Effect) ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยใช้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของจุดสองจุด ผ่านวัสดุตัวกลางที่มีสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริก เรียกว่า วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric materials) อิเล็กตรอนจะเดินทางจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ความแตกต่างของอุณหภูมินี้ทำให้เกิดขั้วไฟฟ้าและความต่างศักย์ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck-effect) ซึ่งสามารถนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้มาใช้ประโยชน์ได้ [10]

2.3 Thermoelectric Generator (TEG)

อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ตามปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) เรียกว่า Thermoelectric Generator (TEG) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยจะนำมาติดตั้งบริเวณที่มีความร้อน เกิดการไล่ระดับอุณหภูมิโดย TEG สามารถรวมเข้ากับเทคโนโลยีที่มีอยู่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวและสามารถใช้จับความร้อนเหลือทิ้งได้ [11] สำหรับการนำมาใช้ในงานโครงสร้างผิวทาง การผลิตไฟฟ้าจะอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองด้าน พลังงานความร้อนที่ดูดซับจากพื้นผิวถนนสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ซึ่งเป็นแหล่งที่มีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าโดยใช้หลักการเทอร์โมอิเล็กทริก แม้พลังงานที่ได้นั้นจะต่ำเกินไป [12] แต่ข้อได้เปรียบของ TEG คือมีอายุการใช้งานยาวนาน และทนทานสามารถทำงานในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง และสามารถฝังเข้าไปในวัตถุอื่น ๆ ได้ เช่น ถนนที่มีการจราจร, ทางเท้า เป็นต้น

จากการศึกษาข้างต้นการนำ Thermoelectric Generator (TEG) มาประยุกต์ใช้ในงานถนนโดยฝังเข้าไปบนพื้นผิวถนน ซึ่งจะกักเก็บพลังงานและเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถือเป็นพลังงานทางเลือกที่ดีและอาจเป็นประโยชน์ในอนาคต

2.4 Graphite composites

กราไฟต์มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี มักใช้เป็นวัสดุนำไฟฟ้าในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำหรับการใช้วัสดุผสมเพิ่มอย่างผงกราไฟต์ในคอนกรีตนั้น พบว่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงตามปริมาณกราไฟต์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความต้องการน้ำของผงกราไฟต์นั้นสูงมาก ปริมาณการใช้น้ำสำหรับส่วนผสมคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก และความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มปริมาณผงกราไฟต์ หมายความว่ากราไฟต์สามารถปรับปรุงการนำไฟฟ้าของคอนกรีตได้ แต่ลดความแข็งแรงลง [13] ทั้งนี้การเติมกราไฟต์ช่วยเพิ่มปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) และคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของกราไฟต์ยังแสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่เห็นได้ชัด เมื่อปริมาณกราไฟต์เพิ่มขึ้นจะแสดงกำลังรับแรงอัดที่ลดลง ในขณะที่อัตราความพรุนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพของปริมาณกราไฟต์ และค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุที่มีซีเมนต์เป็นส่วนประกอบหลัก เมื่อเทียบกับส่วนผสมผงกราไฟท์ในซีเมนต์ ผลกระทบของการเติมกราไฟต์ต่อความแข็งแรงของซีเมนต์นั้นยังมีน้อยมาก [14]

จากการศึกษาข้างต้นมักมุ่งเน้นไปที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าและความแข็งแรงของคอนกรีตเมื่อผสมกราไฟต์เป็นหลัก ดังนั้นการเลือกใช้กราไฟต์ในปริมาณที่เหมาะสม คาดว่าจะสามารถเพิ่มการเก็บเกี่ยวพลังงานความร้อนจากผลเทอร์โมอิเล็กทริกในงานถนนคอนกรีตเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้

2.5 Heat capacity and thermal conductivity

การหาค่าความจุความร้อนและการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วย กราไฟต์และคอนกรีต จำเป็นต้องหาค่าความหนาแน่น ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\rho_e = \rho_g V_g + \rho_c V_c \quad (1)$$

โดยที่ e, g, c หมายถึง คอนกรีตคอมโพสิต , กราไฟต์ และคอนกรีต และ ρ คือความหนาแน่น ดังนั้นความจุความร้อนจำเพาะสามารถหาได้ดังแสดงในสมการที่ (2) โดยไม่พิจารณาผลกระทบของปริมาณความชื้นและอุณหภูมิ

$$C_e = \frac{\rho_g}{\rho_e} V_g C_g + \frac{\rho_c}{\rho_e} V_c C_c \quad (2)$$

โดยที่ C คือความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุคอมโพสิต และ V คือปริมาตร นอกจากนี้ค่าการนำความร้อนสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (3) และ (4)

$$\lambda_{eL} = 1/\left(\frac{V_g}{\lambda_g} + \frac{V_c}{\lambda_c}\right) \quad (3)$$

$$\lambda_{eU} = \lambda_g V_g + \lambda_c V_c \quad (4)$$

โดยที่ λ_{eL} คือค่าการนำความร้อนขอบบน และ λ_{eU} คือค่าการนำความร้อนขอบล่าง ค่าการนำความร้อนตามอัตราส่วนของกราไฟต์ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1 และ 2.5 สามารถเขียนใหม่ได้ดังแสดงในสมการที่ (5) โดยที่ θ คือค่าสัมประสิทธิ์ของสัดส่วน โดยค่าสัมประสิทธิ์กำหนดเป็น 0.95 ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$\lambda_e = \theta\lambda_{eL} + (1-\theta)\lambda_{eU} \quad (5)$$

$$\lambda_e = 0.95\lambda_{eL} + 0.05\lambda_{eU} \quad (6)$$

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่คาดการณ์ไว้ดังสมการที่ (6) สอดคล้องกับผลการทดลองได้ดี [15]

3. วิธีการวิจัย

ในการดำเนินงานศึกษาเรื่อง “การเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้ผลเทอร์โมอิเล็กทริกต่อโครงสร้างคอนกรีตในถนน” มีแนวทางการดำเนินงาน และรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

วัสดุส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานและตัวอย่าง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 1, หิน, ทราย, น้ำ, กราไฟต์ โดยชิ้นงานขนาด 30×20×15 ซม. สำหรับการทดสอบเก็บค่าอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองการให้ความร้อน และตัวอย่าง 10×10×10 ซม. สำหรับการทดสอบการรับแรงอัดเมื่ออายุครบ 28 วัน ซึ่งวัสดุที่นำมาผสมเพิ่ม ได้แก่ กราไฟต์ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1 และ 2.5 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ โดยออกแบบให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 325 ksc เป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานถนนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต กรมทางหลวง (ทล.-ม. 309/2544) รายละเอียดปริมาณส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

Mix Type	w/c	Cement (kg/m³)	Water (kg/m³)	Sand (kg/m³)	Limestone (kg/m³)	Graphite (kg/m³)
Control	0.55	382	210	631	1088	0
GP-0.5%	0.55	382	210	631	1088	1.91
GP-1%	0.55	382	210	631	1088	3.82
GP-2.5%	0.55	382	210	631	1088	9.55

3.2 การทดสอบตัวอย่าง

การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตเพื่อเรียนรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตในการศึกษานี้ ได้แก่ การทดสอบลักษณะของพื้นผิวของวัสดุและรูปร่างของวัสดุ (Scanning Electron Microscope (SEM)) การทดสอบค่าการยุบตัว การทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน และการทดสอบเก็บค่าอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองการให้ความร้อน แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดการทดสอบ

องค์ประกอบทางกายภาพ	ศักยภาพในการใช้งานคอนกรีตด้านกำลัง	ศักยภาพในการใช้งานคอนกรีตด้านความร้อน และไฟฟ้า
การทดสอบลักษณะของพื้นผิว และรูปร่างของวัสดุ (Scanning Electron Microscope (SEM))	การทดสอบค่ายุบตัว	การทดสอบเก็บค่าอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองการให้ความร้อน
	กำลังอัดที่อายุ 28 วัน	

3.2.1 การทดสอบลักษณะของพื้นผิว และรูปร่างของวัสดุ (Scanning Electron Microscope (SEM))

เมื่อตัวอย่างที่ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ไปหาค่ากำลังอัดสูงสุดแล้ว ให้นำตัวอย่างไปทดสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ที่สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) : National Science and Technology Development Agency : NSTDA - Thailand.

3.2.2 การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test)

การทดสอบค่าการยุบตัวจะวัดความสามารถในการใช้การได้ และความสม่ำเสมอของตัวอย่างคอนกรีตโดยปฏิบัติตามวิธีการทดลองทล.-ท.304 "วิธีการทดลองหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต"

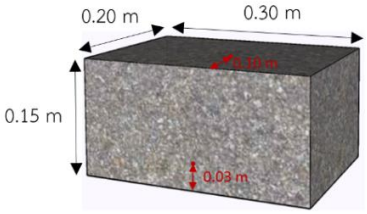
3.2.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength Test)

เมื่อครบกำหนดทดสอบที่อายุ 28 วัน ในแต่ละตัวอย่าง ให้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ตัวอย่างคอนกรีตสามารถทนต่อได้ ใช้ตัวอย่างคอนกรีต (ลูกบาศก์) สำหรับเครื่องทดสอบแรงอัด เพื่อทำการทดสอบนี้ ตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบนี้ล้วนมีขนาด 10x10x10 ซม. โดยปฏิบัติตามวิธีการทดลองทล.-ท.302 "วิธีการทดลองหาค่าแรงอัดของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกและรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์" (เทียบเท่า ASSHO T 22-66 และ BS. 1881 : Part 4 : 1970)

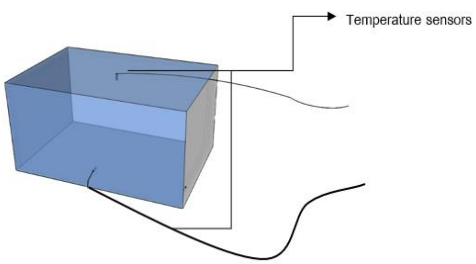
3.2.4 การทดสอบเก็บค่าอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองการให้ความร้อน

เมื่อตัวอย่างที่ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ไปหาค่ากำลังอัดสูงสุดแล้ว ให้นำตัวอย่างไปทดสอบเก็บค่าอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองการให้ความร้อน โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

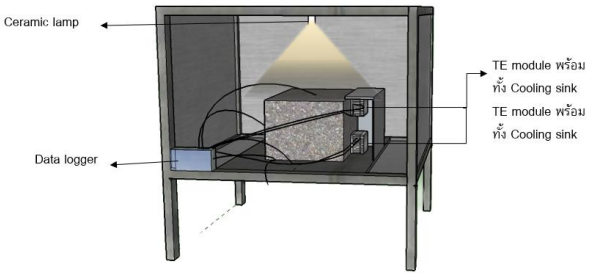
นำชิ้นงานคอนกรีตไปเจาะรูเป็นความลึก 2 ซม. เพื่อติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ ดังรูปที่ 1 จากนั้นประกอบชิ้นงานคอนกรีตที่เจาะรูแล้วประกอบกับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2 และนำชิ้นงานที่ประกอบกันไว้มาวางใต้ชุดให้ความร้อนและติดตั้งนำ TE module พร้อมทั้ง Cooling sink สำหรับการทดสอบ จากนั้นต่อ Data logger ดังรูปที่ 3 ต่อมาให้ความร้อนตัวอย่างโดยเปิดหลอดเซรามิค 150 watt เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาพในตอนกลางวันของคอนกรีต หลังจากครบ 6 ชั่วโมงแล้วปิดหลอดไฟแล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลง 6 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมในตอนกลางคืนของคอนกรีต ตลอดระยะเวลาการทดสอบ Data logger จะทำหน้าที่บันทึกข้อมูลเก็บไว้



รูปที่ 1 ขนาดของชิ้นงานคอนกรีตที่นำมาใช้ทดสอบและตำแหน่งการเจาะรู



รูปที่ 2 การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิในชิ้นงานคอนกรีต



รูปที่ 3 แบบจำลองการจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

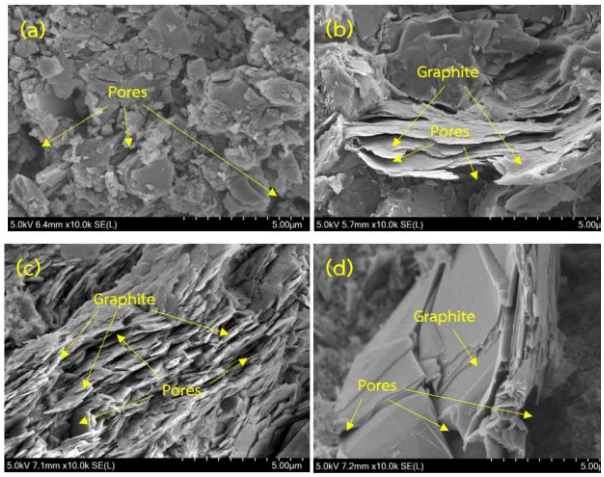
4. ผลการวิจัย

ในศึกษาเรื่อง “การเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้ผลเทอร์โมอิเล็กทริกต่อโครงสร้างคอนกรีตในถนน” ได้ผลการทดลองจากการทดสอบค่าการยุบตัว การทดสอบการนำความร้อน การทดสอบการนำไฟฟ้า การทดสอบกำลังรับแรงอัด และการทดสอบลักษณะของพื้นผิวของวัสดุ ได้ดังนี้

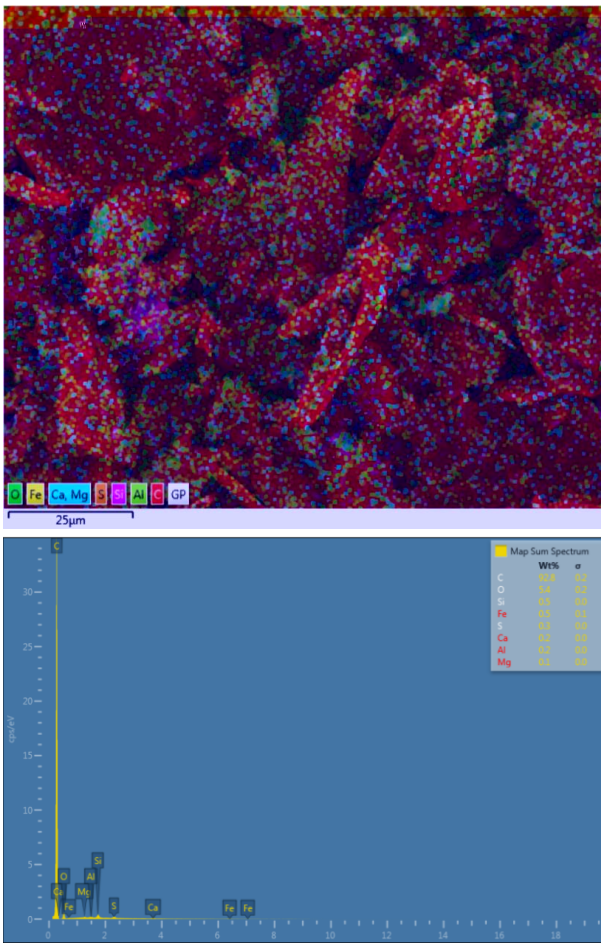
4.1 การทดสอบลักษณะของพื้นผิว และรูปร่างของวัสดุ (Scanning Electron Microscope (SEM))

จากภาพถ่าย SEM ลักษณะทางกายภาพคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม (a) Control ; (b) 0.5%GP ; (c) 1%GP ; (d) 2.5%GP ในรูปที่ 4 เราจะเห็นว่า (a) มีรูพรุนและรูปแบบรอยต่อของรูพรุน ที่แตกต่างจาก (b) (c) (d) โดยที่ (a) มีรูพรุนกระจายแบบสุ่มและมีรูพรุนที่มีขนาดเล็ก ในขณะที่ (b) (c) (d) มีเรียงตัวจากกราไฟต์ที่ผสมเพิ่มลงในคอนกรีตทำให้เกิดรูปแบบของรูพรุนลักษณะเป็นโครงสร้างผลึกเป็นชั้นที่จะแตกต่างจาก (a) อย่างชัดเจน โดยมีขนาดรูพรุนที่ละเอียดและการกระจายตัวแบบสุ่ม ซึ่งการนำความร้อนของคอนกรีตที่มีรูพรุน แม้ว่าค่าการนำความร้อนของคอนกรีตพรุนจะลดลงเมื่อความพรุนเพิ่มขึ้นโดยทั่วไป แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าการนำความร้อนจะได้รับผลกระทบจากความรูปแบบและทิศทางของรูพรุน ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาโครงสร้างจุลภาคที่ไม่สม่ำเสมอของคอนกรีตที่มีรูพรุนเพิ่มเติมสำหรับการคาดการณ์พฤติกรรมการนำความร้อนได้อย่างแม่นยำ [16] แต่สำหรับกราไฟต์ที่มีคุณสมบัติด้านการนำความร้อนและไฟฟ้าเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวอยู่แล้วนั้น โดยในการทดสอบมีปริมาณคาร์บอนในกราไฟต์สูงถึงร้อยละ 92.8 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 5 บ่งบอกถึงการปนเปื้อนน้อย โดยคาร์บอนมีโครงสร้างผลึกเป็นชั้นๆ เมื่อปริมาณกราไฟต์เพิ่มขึ้นจะแสดงผลด้านอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราความพรุนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าโครงสร้างผลึกเป็นชั้นเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณกราไฟต์เพิ่มขึ้น ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้พบรอยต่อจากกราไฟต์ที่ผสมเพิ่มทำให้เกิดรูพรุนในรูปแบบที่แตกต่างจากคอนกรีตล้วน ดังนั้นควรพิจารณาและศึกษาผลของรูปแบบรูพรุนต่อการนำความร้อนในอนาคตเพื่อให้ทราบผลกระทบจากรูปแบบของรูพรุนต่อการนำความร้อน

แม้ว่าการเพิ่มปริมาณกราไฟต์จะทำให้ผลด้านอุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ยังจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของรูปแบบรูพรุนที่เป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณของกราไฟต์ซึ่งส่งผลต่อการนำความร้อนในคอนกรีต



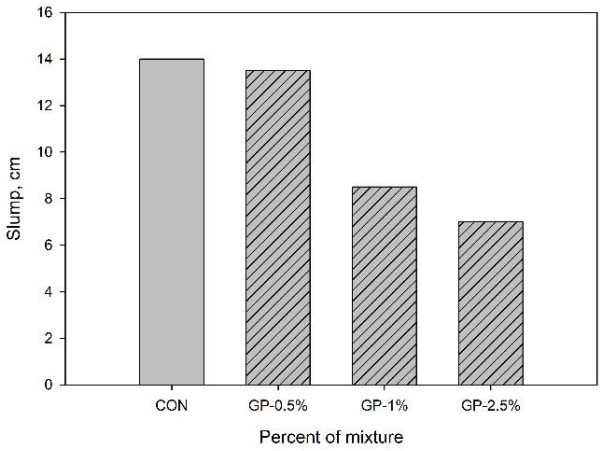
รูปที่ 4 ลักษณะทางกายภาพคอนกรีตในแต่ละส่วนผสมโดยกำลังขยาย 10k
(a) Control ; (b) GP-0.5% ; (c) GP-1% ; (d) GP-2.5%



รูปที่ 5 องค์ประกอบธาตุในผงกราไฟต์จากผลของ EDX

4.2 การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test)

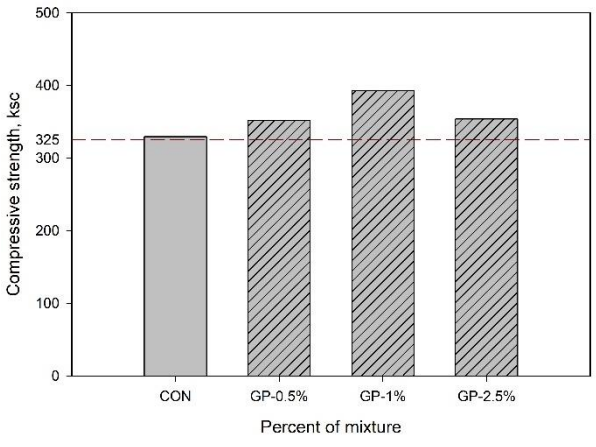
ค่าการยุบตัวจะแสดงความสอดคล้องของความสามารถในการใช้งานได้ของส่วนผสมคอนกรีต จากผลการทดสอบพบว่าค่ายุบตัวของคอนกรีตล้วนอยู่ที่ 14 ซม. และคอนกรีตผสมเพิ่มกราไฟต์ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1 และ 2.5 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ อยู่ที่ 13.5, 8.5 และ 7.0 ซม. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยเมื่อปริมาณกราไฟต์เพิ่มขึ้นค่าการยุบตัวมีแนวโน้มลดลงร้อยละ 3.6, 39 และ 50 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตล้วน



รูปที่ 6 ค่ายุบตัวของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม

4.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ตัวอย่างคอนกรีตสามารถทนต่อได้ ใช้ตัวอย่างคอนกรีต (ลูกบาศก์) สำหรับเครื่องทดสอบแรงอัด ตามมาตราฐาน จากรูปที่ 7 พบว่าคอนกรีตผสมเพิ่มกราไฟต์ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1 และ 2.5 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ แสดงกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.9, 19.3 และ 7.4 ตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตล้วน และเมื่อปริมาณกราไฟต์เพิ่มขึ้นเกินร้อยละ 1 จะแสดงกำลังรับแรงอัดที่ลดลง

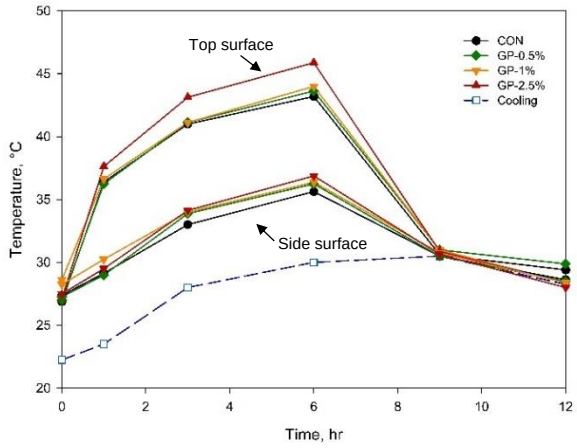


รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม

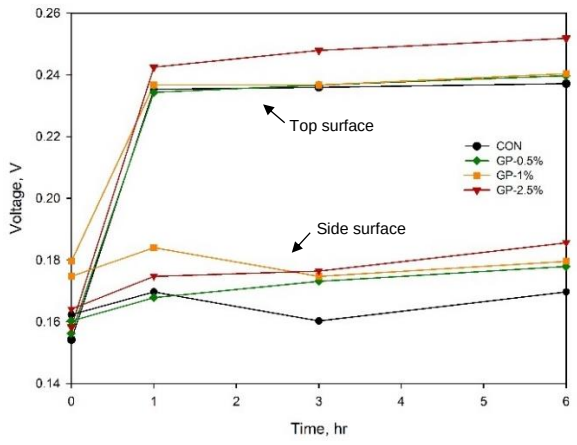
4.4 การทดสอบเก็บค่าอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองการให้ความร้อน

จากรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม ทั้งในกรณีด้านบนและด้านข้าง พบว่าอุณหภูมิของคอนกรีตผสมเพิ่มกราไฟต์ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1 และ 2.5 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ เพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อเทียบกับคอนกรีตล้วน อุณหภูมิในกรณีด้านบนสูงกว่ากรณีด้านข้าง เนื่องจากบริเวณด้านบนได้รับความร้อนจากหลอดเซรามิค 150 watt โดยตรง โดยให้อุณหภูมิสูงสุด 45.9 องศาเซลเซียส มีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าสูงสุดด้วยเช่นกัน โดยให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.25 V ดังแสดงในรูปที่ 9

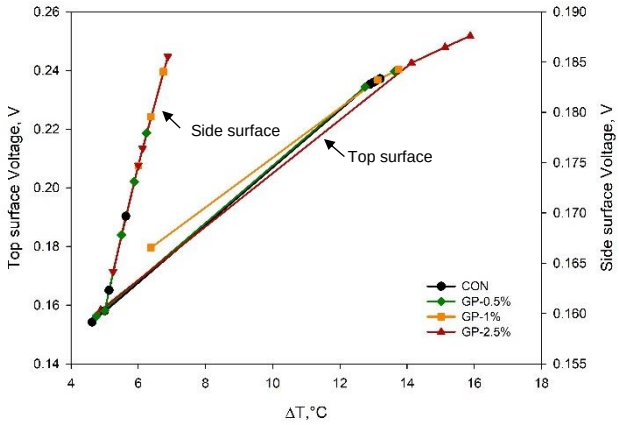
จากรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม โดยใช้ความแตกต่างอุณหภูมิทั้งในกรณีด้านบนและด้านข้างเทียบกับอุณหภูมิจาก cooling sink พบว่ายิ่งความแตกต่างของอุณภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม ในกรณีด้านบนและด้านข้าง



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลา ของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม ในกรณีด้านบนและด้านข้าง



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าของคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม ในกรณีด้านบนและด้านข้าง

4.5 Heat capacity and thermal conductivity

แบบจำลองสำหรับประเมินความร้อนของคอนกรีตสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตล้วนพบว่า คอนกรีตผสมเพิ่มกราไฟต์ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1, 2.5 โดยน้ำหนักซีเมนต์จะให้ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 8

ตารางที่ 3 แบบจำลองสำหรับประเมินความร้อนของคอนกรีต

Sample	Mass Fraction	Density (kg/m³)	Specific Heat Capacity (kJ/kg.K)	Thermal Conductivity (W/m.K)
Concrete	100%	2400	0.960	1.280
Graphite	0.50%	2411.34	0.959	1.312
	1%	2422.67	0.958	1.344
	2.50%	2456.68	0.954	1.441

5. บทสรุปการวิจัย

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากผลเทอร์โมอิเล็กทริกต่อโครงสร้างคอนกรีตในถนน โดยการเติมวัสดุผสมเพิ่มกราไฟต์ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1 และ 2.5 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ หลังจากนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสามารถวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

(1) โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมกราไฟต์จะมีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น ตามปริมาณกราไฟต์ที่ผสมลงในคอนกรีต และมีรูปแบบและการกระจายตัวของรูพรุนที่แตกต่างกับคอนกรีตล้วน ซึ่งขนาดของรูพรุนมีผลต่อการนำความร้อน แม้ว่ารูพรุนจะส่งผลต่อการนำความร้อนก็ตาม แต่

ตัวกราไฟต์เองก็มีคุณสมบัติในการนำความร้อนได้ดี จึงทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติด้านการนำความร้อนเพิ่มขึ้น

(2) จากการทดสอบผลด้านอุณหภูมิของคอนกรีตเมื่อเติมวัสดุผสมเพิ่มกราไฟต์ค่าที่ได้จะเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับแบบจำลองสำหรับประเมินความร้อนของคอนกรีตโดยกราไฟต์ได้ดี

(3) คอนกรีตเมื่อเติมวัสดุผสมเพิ่มกราไฟต์ในปริมาณร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก พบว่าให้อุณหภูมิสูงที่สุดทั้งผิวด้านบนและผิวด้านข้าง ดังนั้นเมื่อปริมาณกราไฟต์เพิ่มขึ้นยิ่งทำให้ความสามารถในการนำความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่อติดตั้งอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกความแตกต่างของอุณหภูมิมากขึ้น ส่งผลให้การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเติมกราไฟต์สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพด้านความร้อนในโครงสร้างคอนกรีต

6. ข้อเสนอแนะ

ผลที่ได้จากการทดลองนี้ โดยการเก็บอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าด้วยเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เป็นเพียงการนำเสนอเชิงแนวโน้มเท่านั้น ถึงแม้ว่าผลและแนวทางการเก็บเกี่ยวพลังงานในงานวิจัยนี้จะยังไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้ในงานก่อสร้างแต่ในอนาคตหากมีการพัฒนาอุปกรณ์รวมไปถึงแนวทางการเก็บเกี่ยวพลังงานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ก็จะสามารถนำไปก่อสร้างจริงได้ นอกเหนือจากนี้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริก ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดสองจุดเป็นสิ่งสำคัญ การติดตั้งฉนวนที่ป้องกันไม่ให้ความร้อนจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงกระทบต่อด้านที่มีอุณหภูมิต่ำนั้นจะทำให้การเก็บเกี่ยวพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริกมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามระดับความลึกหรือตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมีผลต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริกอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในการเก็บเกี่ยวพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริกในโครงสร้างถนน ควรติดตั้งอุปกรณ์ให้ใกล้เคียงกับผิวบนมากที่สุด เพื่อทำให้เกิดความต่างของอุณหภูมิมากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

[1] Lonngren, K. E., & Bai, E. W. (2008). On the global warming problem due to carbon dioxide. *Energy Policy*, *36*(4), 1567-1568.

[2] Garrett, C. W. (1992). On global climate change, carbon dioxide, and fossil fuel combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, *18*(5), 369-407.

[3] Williams, B. (2003). Peak-oil, global warming concerns opening new window of opportunity for alternative energy sources. *Oil & Gas Journal*, *101*(32), 18-18.

[4] Adedoyin, F. F., Alola, A. A., & Bekun, F. V. (2021). The alternative energy utilization and common regional trade outlook in EU-27: evidence from common correlated effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *145*, 111092.

[5] Mao, G., Liu, X., Du, H., Zuo, J., & Wang, L. (2015). Way forward for alternative energy research: A bibliometric analysis during 1994–2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *48*, 276-286.

[6] Mona, Y., Jitsangiam, P., & Punyawudho, K. (2021). A comparison of energy harvesting from cement and asphalt on road pavement using thermoelectric module. *Energy Reports*, *7*, 225-229.

[7] Rahman, M. L., Malakooti, A., Ceylan, H., Kim, S., & Taylor, P. C. (2022). A review of electrically conductive concrete heated pavement system technology: From the laboratory to the full-scale implementation. *Construction and Building Materials*, *329*, 127139.

[8] Rao, R., Fu, J., Chan, Y., Tuan, C. Y., & Liu, C. (2018). Steel fiber confined graphite concrete for pavement deicing. *Composites Part B: Engineering*, *155*, 187-196.

[9] กรสุชา ปาลศิริ และ พัชรินทร์ ศรีอิสรีย (2565). รายงานปริมาณการเดินทางบนทางหลวง ประจำปี 2565 , หน้า 1.

[10] Lee, H. (2016). Thermoelectric Generators. homepages. wmich. edu/~ leehs/ME539/Thermoelectric% 20Contact% 20Resistances. pdf.[Accessed 15 february 2017].

[11] Lee, J. J., Kim, D. H., Lee, S. T., & Lim, J. K. (2014). Fundamental study of energy harvesting using thermoelectric effect on concrete structure in road. In *Advanced Materials Research* (Vol. 1044, pp. 332-337). Trans Tech Publications Ltd.

[12] Wu, T., Huang, R., Chi, M., & Weng, T. (2013). A study on electrical and thermal properties of conductive concrete. *Computers and Concrete*, *12*(3), 337-349.

[13] Singh, V. P., Kumar, M., Srivastava, R. S., & Vaish, R. (2021). Thermoelectric energy harvesting using cement-based composites: a review. *Materials Today Energy*, *21*, 100714.

[14] Liu, S. H., Wu, M. Q., Rao, M. J., Li, L. H., & Xiao, H. L. (2019). Preparation, properties, and microstructure of graphite powder-containing conductive concrete. *Strength of Materials*, 51(1), 76-84.

[15] Rao, R., Wang, H., Wang, H., Tuan, C. Y., & Ye, M. (2019). Models for estimating the thermal properties of electric

heating concrete containing steel fiber and graphite. *Composites Part B: Engineering*, *164*, 116-120.

[16] Chen, J., Wang, H., Xie, P., & Najm, H. (2019). Analysis of thermal conductivity of porous concrete using laboratory measurements and microstructure models. *Construction and Building Materials*, *218*, 90-98.