

การเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้ผลเทอร์โมอิเล็กทริกต่อวัสดุผิวทาง

Energy harvesting from thermoelectric effects of Pavement Materials

หฤษฎ์ หงษ์ทอง¹ ภูมิภิติ ทำเนียบ² สุรนารถ สุชี³ และ จินตหรา ลาวงศ์เกิด^{4*}

^{1,2,3} โครงการหลักสูตรนวัตกรรมทางวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

⁴ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

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

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีความพยายามในการหาแหล่งพลังงานทดแทน เพื่อมาแทนที่พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ทั้งจากแสงอาทิตย์ น้ำ ลม หรือแหล่งอื่นๆ ซึ่งผลเทอร์โมอิเล็กทริกก็เป็นอีกแหล่งพลังงานที่น่าสนใจ การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกต่อวัสดุผิวทาง (แอสฟัลต์) มาเป็นพลังงานทดแทน ในอนาคต และศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติการนำความร้อนของแอสฟัลต์ที่มีวัสดุผสมแตกต่างกัน ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้เส้นใยเหล็กปลายตะขอ (Steel Fiber) และแกรไฟต์ (Graphite) ทางคณะผู้วิจัยได้อ้างอิงมาตรฐานงานทางของกรมทางหลวงมาใช้ในการสร้างแบบจำลองผิวทางทำการวิจัยโดยจำลองสภาพแวดล้อมของผิวทางโดยให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง และหยุดให้พลังงานเป็นเวลา 6 ชั่วโมงเท่ากัน เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมในตอนกลางวันและกลางคืน ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลค่าอุณหภูมิ ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูล ผลการวิจัยครั้งนี้พบว่า การสร้างพลังงานด้วยเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นสามารถเป็นไปได้จริงกับวัสดุผิวทาง (แอสฟัลต์) ซึ่งแบบจำลองผิวทางที่ทำการผสมด้วยผงแกรไฟต์มีคุณสมบัติด้านการเก็บพลังงานความร้อน (Heat retention) ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ และการเพิ่มเส้นใยเหล็กปลายตะขอจะทำให้การเก็บพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่ยังน้อยกว่าแกรไฟต์เล็กน้อย

คำสำคัญ: เทอร์โมอิเล็กทริก, แอสฟัลต์, แกรไฟต์, เส้นใยเหล็กปลายตะขอ

Abstract

Nowadays, there are initiatives to replace fossil fuel energy with energy from renewable sources, such as solar, water, wind, and others. The thermoelectric effect is another fascinating source of energy. This research aims to examine the viability of using thermoelectric technology to asphalt pavement materials in the future as a renewable energy source, as well as the thermal conductivity qualities of asphalt with various composite materials. The steel fiber and graphite powder were added to the mixture of pavement materials designed with

reference to road work standards of the Department of Highways of Thailand. Simulate the pavement environment to replicate the daytime and nighttime surroundings. The temperature, voltage, and current values were then gathered for analysis. The findings indicate that asphalt pavement material is suitable for energy generation via thermoelectric technology. Graphite-infused pavements have significantly enhanced heat retention properties. Adding steel fiber also increases its capacity to store heat, but to a lesser extent than graphite.

Keywords: Thermoelectric, Asphalt, Graphite, Steel fiber

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานจากธรรมชาตินับเป็นอีกทางเลือกของความยั่งยืนทางด้านพลังงาน ที่จะเข้ามาแทนที่พลังงานที่ได้จากฟอสซิล ทั้งน้ำมันดิบ และถ่านหิน การเสาะหาแหล่งพลังงานอื่นๆจึงมีความสำคัญมากขึ้นในปัจจุบัน เพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางของ Sustainable Development Goals (SDGs) เป้าหมายที่ 7 ว่าด้วยการสร้างหลักประกันให้ทุกคนสามารถเข้าถึงพลังงานสมัยใหม่ที่ยั่งยืนในราคาที่ย่อมเยา มีเป้าประสงค์ครอบคลุม 3 ประเด็นหลักคือ การเข้าถึงพลังงาน การเพิ่มสัดส่วนพลังงานทดแทน และการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ทำให้การศึกษารวบรวมเกี่ยวพลังงานจากแหล่งที่มาใหม่ๆ จึงเป็นการวางรากฐานให้กับการพัฒนา และแนวทางสำหรับอนาคตต่อไป [1]

ผู้จัดทำได้สืบค้นและพบว่า มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าบนชั้นผิวทางโดยกระบวนการเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งใช้ผลต่างอุณหภูมิของสองพื้นผิวในการไหลเวียนอิเล็กตรอนทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากกลุ่มอิเล็กตรอนในโลหะด้านร้อนจะมีพลังงานจลน์สูงกว่าโลหะด้านเย็นและเคลื่อนที่เร็วกว่า จึงทำให้ปริมาณของอิเล็กตรอนที่ปลายโลหะไม่เท่ากัน โดยประเทศที่ทำการวิจัยคือประเทศเกาหลีใต้ [2] ซึ่งมีสภาพภูมิอากาศแบบซีกโลกเหนือที่ค่อนข้างหนาวเย็น โดยทำการทดลองกับพื้นผิวถนนคอนกรีต บันทึกผลในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมตัวแปรที่เกี่ยวข้อง [3] ขณะที่ในประเทศไทยเป็นประเทศใน

แถบเส้นศูนย์สูตรที่มีสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น มีการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นหลักในการทำถนนทั่วทุกภูมิภาค ในปี พ.ศ. 2565 มีถนนที่อยู่ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงกว่า 5 หมื่นกิโลเมตร เป็นถนนแบบแอสฟัลต์ถึง 95% [4] แม้อายุการใช้งานของถนนแบบแอสฟัลต์จะน้อยกว่า ต้องการการบำรุงรักษาที่มากกว่า แต่ด้วยต้นทุนการก่อสร้างต่อระยะทางที่ถูก และระยะเวลาในการก่อสร้างที่สั้นกว่าถนนคอนกรีตจึงทำให้ถนนแบบแอสฟัลต์ได้รับความนิยมมาก ในปัจจุบันยังมีการนำวัสดุมาใช้เป็นส่วนผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแอสฟัลต์ ไม่ว่าจะเป็น แกรไฟต์ เหล็กปลายตะขอ เข้ามาผสมด้วย โดยวัสดุที่นำมาผสมเหล่านี้มักจะนำมาใช้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์

ทั้งนี้ผลการศึกษากว้างขวางเกี่ยวกับคุณสมบัติด้านการนำความร้อนของวัสดุผิวทางยังมีน้อย ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ผู้จัดทำต้องการศึกษา ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงเล็งเห็นว่าพื้นผิวของถนนแอสฟัลต์ก็มีการสะสมพลังงานความร้อน จึงสามารถนำความร้อนที่เก็บสะสมอยู่ในถนนแอสฟัลต์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้โดยกระบวนการเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยใช้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของจุดสองจุด โดยอิเล็กตรอนจะเดินทางจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าบนผิววัสดุทั้งสองฝั่ง ทำให้เกิดความต่างของอิเล็กตรอนส่งผลให้เกิดการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้ [5] ทางผู้จัดทำจึงอยากนำกระบวนการนี้มาปรับใช้กับถนนแอสฟัลต์ภายในประเทศไทย

โดยทำการทดสอบการสร้างกระแสไฟฟ้าจากกระบวนการเทอร์โมอิเล็กทริกบนพื้นผิวแอสฟัลต์ เพื่อที่จะศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากกระบวนการเทอร์โมอิเล็กทริกของพื้นผิวแอสฟัลต์ วัสดุผสมที่แตกต่างกันมีผลต่อการนำความร้อนของแอสฟัลต์ เพื่อหาความเป็นไปได้ในการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นพลังงานทดแทนในอนาคต โดยเปรียบเทียบค่าการนำความร้อน พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแอสฟัลต์ที่มีวัสดุผสมแตกต่างกัน และหาตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อนของแอสฟัลต์

ผู้จัดทำจึงต้องการที่จะทราบถึงผลลัพธ์ของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก การคาดคะเนความเป็นไปได้จากทิศทางการพัฒนาเทคโนโลยีของเทอร์โมอิเล็กทริกและแนวทางในการต่อยอดในการสร้างพลังงานจากพื้นผิวแอสฟัลต์หรือพื้นผิวอื่นๆ โดยใช้หลักการเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในอนาคต

2. วัสดุ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และวิธีการทดสอบ

2.1 แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete or Hot - Mix Asphalt)

2.1.1 มวลรวม มวลรวมประกอบด้วยมวลหยาบ (Coarse Aggregate) และมวลละเอียด (Fine Aggregate)

กรณีที่มีมวลละเอียดมีขนาดเล็กไม่พอ หรือต้องการปรับปรุงคุณภาพและความแข็งแรง ของแอสฟัลต์คอนกรีต อาจเพิ่มวัสดุผสมแทรก ด้วยก็ได้ ขนาดละเอียด (Gradation) ของมวลรวมให้เป็นไปตามตารางที่ 1

2.1.2 มวลหยาบ หมายถึงส่วนที่ค้ำตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) เป็นหินย่อย (Crushed Rock) หรือวัสดุอื่นใดที่กรมทางหลวงอนุมัติให้ใช้ได้ ต้องเป็นวัสดุที่แข็ง และคงทน (Hard and Durable) สะอาดปราศจากวัสดุไม่พึงประสงค์ใดๆที่อาจทำให้แอสฟัลต์ คอนกรีตมีคุณภาพด้อยลง

ขนาดที่ไซ้เบรก มิลลิเมตร (นิ้ว)	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19.0 (3/4)	25.0 (1)
ลำดับชั้นต่าง	Wearing Course	Wearing Course	Binder Course	Base Course
ความหนา มิลลิเมตร	25-35	40-70	40-80	70-100
ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร (นิ้ว)	ปริมาณขนาดตะแกรง ระยะละ 10 มม.			
37.5 (1 1/2)				100
25.0 (1)			100	90-100
19.0 (3/4)		100	90-100	-
12.5 (1/2)	100	80-100	-	56-80
9.5 (3/8)	90-100	-	56-80	-
4.75 (เบอร์ 4)	55-85	44-74	35-65	29-59
2.36 (เบอร์ 8)	32-67	28-58	23-49	19-45
1.18 (เบอร์ 16)	-	-	-	-
0.600 (เบอร์ 30)	-	-	-	-
0.300 (เบอร์ 50)	7-23	5-21	5-19	5-17
0.150 (เบอร์ 100)	-	-	-	-
0.075 (เบอร์ 200)	2-10	2-10	2-8	1-7
ปริมาณแอสฟัลต์ ระยะละ 10 มม. ของมวลรวม	4.0-8.0	3.0-7.0	3.0-6.5	3.0-6.0

รูปที่ 1 ขนาดละเอียดของมวลรวมและปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ (มาตรฐาน ทล.-ม. 416/2556) [6]

2.1.3 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

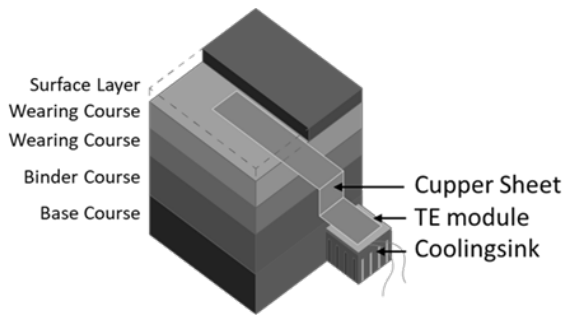
ชั้นทาง	Wearing Course	Binder Course	Base Course
ขนาดที่ไซ้เบรก มิลลิเมตร (นิ้ว)	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19 (3/4)
ความหนา มิลลิเมตร	25 - 35	40 - 70	40 - 80
Number of Blows (Each End)	75	75	75
Stability N Min. (1b) Min.	9786 (2 200)	9786 (2 200)	9786 (2 200)
Flow 0.25 mm (0.01 in.)	9 - 17	9 - 17	9 - 17
Percent Air Voids	3 - 5	3 - 5	3 - 5
Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA) Min.	15	14	13
Stability / Flow Min.			
N / 0.25 mm (lb / 0.01 in.)	750	750	750
Percent Strength Index Mn	75	75	75

รูปที่ 2 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต (มาตรฐาน ทล.-ม. 416/2556) [6]

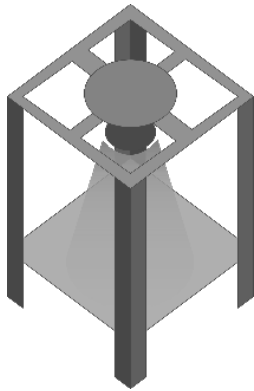
2.2 การดำเนินการทดลอง

การทดลองจะทำการสร้างแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐาน ทล.-ม. 416/2556 [6] ที่ผสมด้วยวัสดุผสม (Mixed Material) ที่แตกต่างกันในหลายอัตราส่วน ซึ่งประกอบด้วย ก้อนอ้างอิงกรมทางหลวง (DOH Standard) จะใช้เป็นชิ้นงานอ้างอิงการทดลอง ก้อนผสมผงแกรไฟต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 1 และ 2 เทียบกับน้ำหนักของมวลรวม และผสมเส้นใยเหล็กปลายตะขออัตราส่วนร้อยละ 1 และ 2 เทียบกับน้ำหนักของมวลรวม โดยจะจำลองเป็นพื้นผิวถนนที่รับความร้อน มีขนาด 15x15x10 ซม. ติดตั้งแผ่นทองแดงเข้าไปในตัวชิ้นงาน ระหว่างชั้น Surface Layer กับ Wearing course ตามรูปที่ 3ก. โดยให้มีส่วนของแผ่นทองแดงที่ยื่นออกมาประมาณ 50% ของพื้นที่ผิวทั้งหมด ให้ความร้อนชิ้นงานด้วยหลอดเซรามิก ขนาด

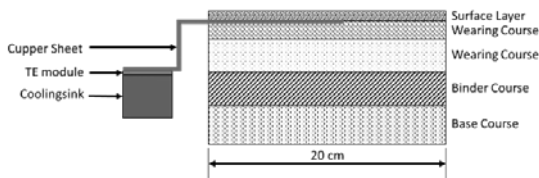
150 วัตต์ ตามรูปที่ 3ข. เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้ชั้นงานเย็นตัวอีก 6 ชั่วโมง ทำการบันทึกค่าข้อมูลอุณหภูมิด้วยอุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data Logger) ที่พื้นผิว, แอสฟัลต์ (~50 มม. จากพื้นผิว) และแผ่นทองแดง ทุกๆ 2 นาที ตลอดระยะเวลาการทดลอง 12 ชั่วโมง นำค่าข้อมูลที่ได้เพื่อไปหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความลึก และค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำความร้อน



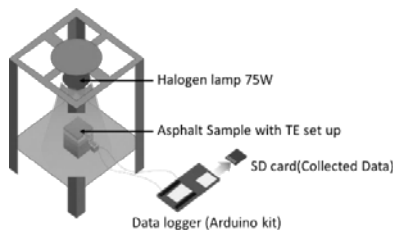
ก. ชั้นงานแอสฟัลต์คอนกรีตพร้อมตัว TE module



ข. ภาพแสดงชุดประกอบสำหรับให้ความร้อนขึ้นงาน



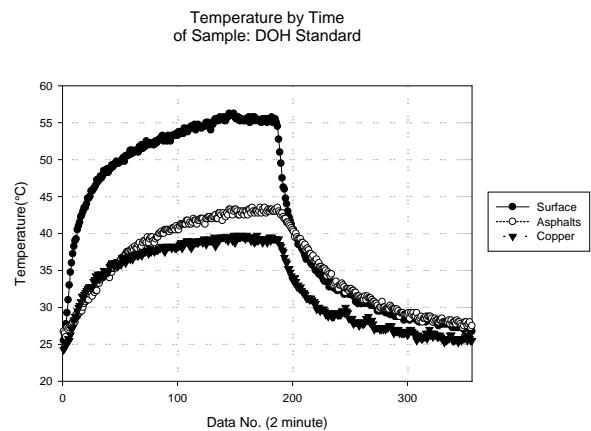
ค. ภาพตัดขวาง (Cross-section) ของชั้นงานแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้



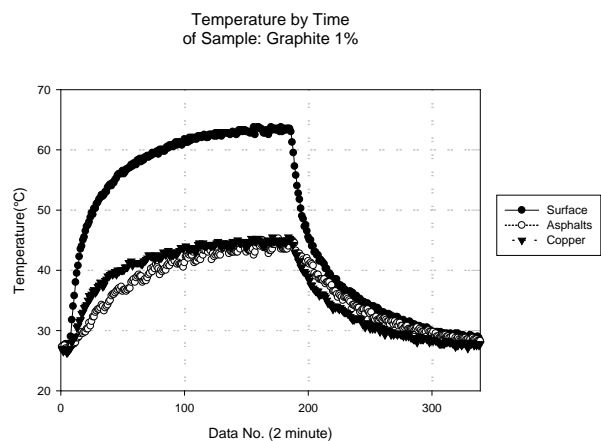
ง. ภาพการจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองรูปที่ 3 ขั้นตอนในการทดสอบการให้ความร้อนแก่ก้อนแอสฟัลต์

3. ผลการดำเนินงานและการอภิปรายผล

จากการทดลองได้กราฟความสัมพันธ์ ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา หลังจากเปิดหลอดไฟจะมีความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ และจะลดลง หลังจากปิดหลอดไฟ ณ เวลา 6 ชั่วโมง โดยมีชั้นงานอ้างอิงเป็นก้อนที่ทำตามมาตรฐานของกรมทางหลวง แสดงในรูปที่ 4 จากการทดสอบใส่ส่วนผสมเพิ่มพบว่าการใส่แกรไฟต์ที่อัตราส่วนอัตราส่วนร้อยละ 1 ของมวลรวม รูปที่ 5 ทำให้ค่าอุณหภูมิของพื้นผิว (Surface) สูงกว่าก้อนอ้างอิง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็นร้อยละ 2 ของมวลรวม แม้จะทำให้อุณหภูมิของพื้นผิวลดลงแต่ ค่าความต่างของพื้นผิวกับตัวแอสฟัลต์มีค่าลดลง แสดงในรูปที่ 6 ซึ่งหมายถึงมีการนำความร้อนที่ดี และในส่วนของกราฟผสมเหล็กปลายตะขอ [7] ที่อัตราส่วนร้อยละ 1 และ 2 ของมวลรวม แม้อุณหภูมิพื้นผิวจะไม่สูงมากเมื่อเทียบกับก้อนอ้างอิง แต่ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมีน้อยกว่าของก้อนอ้างอิง แสดงในรูปที่ 7 และ 8 ซึ่งข้อมูลที่ได้ จะนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำความร้อน แสดงในรูปที่ 9 และ ค่า Air Voids แสดงในตารางที่ 4

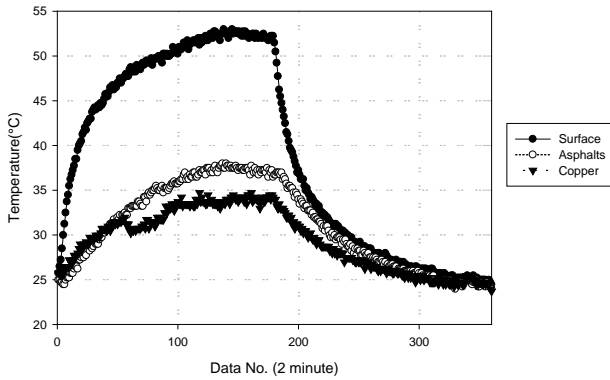


รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลา Surface Asphalts และ Copper ของก้อนอ้างอิงกรมทางหลวง



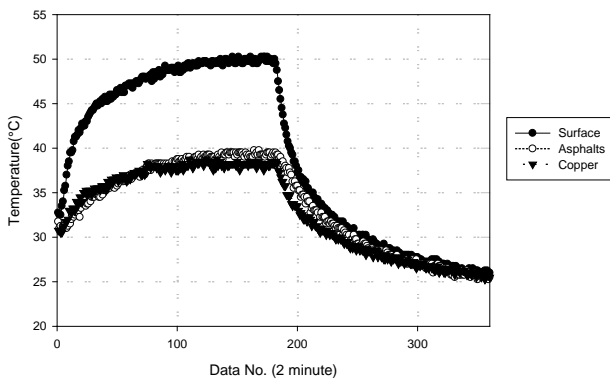
รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลา Surface Asphalts และ Copper ของแกรไฟต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 1 ของมวลรวม

Temperature by Time of Sample: Graphite 2%



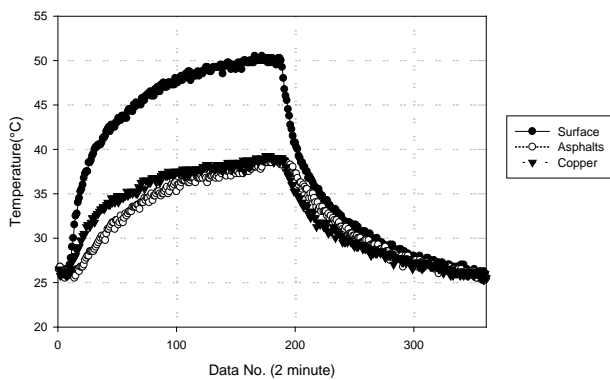
รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลา Surface Asphalts และ Copper ของแกรไฟต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ของมวลรวม

Temperature by Time of Sample: Steel Fiber 1%



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลา Surface Asphalts และ Copper ของเส้นใยเหล็กปลายตะขอที่อัตราส่วนร้อยละ 1 ของมวลรวม

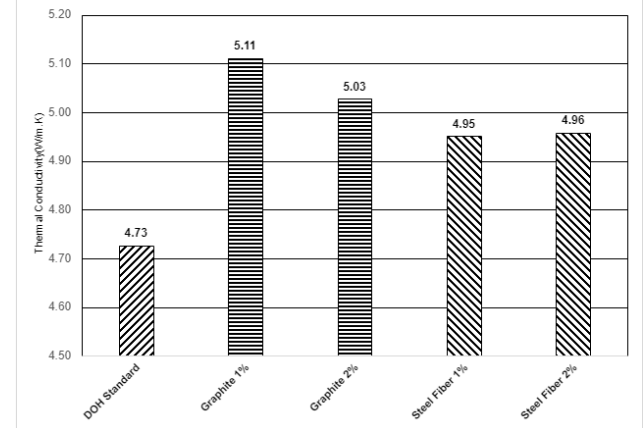
Temperature by Time of Sample: Steel Fiber 2%



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ค่าระหว่างอุณหภูมิกับเวลา Surface Asphalts และ Copper ของเส้นใยเหล็กปลายตะขอที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ของมวลรวม

จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำความร้อน (K) ของชิ้นงานแอสฟัลต์ ที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกัน มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญ การผสมแกรไฟต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0.5, 1 และ 2 ของมวลรวม ทำให้ค่า K มีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือที่ร้อยละ 1 ของมวลรวม และค่าจะลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของแกรไฟต์ ในส่วนของเส้นใยเหล็กปลายตะขอก็กังทำให้ออสฟัลต์ที่มีค่า K ที่เพิ่มขึ้น และจากการพิจารณาค่า K ของชิ้นงานแอสฟัลต์ที่ผสมเส้นใยเหล็กปลายตะขอในอัตราส่วนร้อยละ 1 และ 2 ของน้ำหนักมวลรวม พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่ยังคงน้อยกว่าชิ้นงานที่ผสมแกรไฟต์

Thermal Conductivity of Sample



รูปที่ 9 แผนภูมิแท่งค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำความร้อน (K) ของชิ้นงานแอสฟัลต์ที่มีส่วนผสมที่ต่างกัน

จากตารางที่ 1 แสดงค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่ได้จากความต่างของอุณหภูมิที่มีค่าต่างกันมากจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาที่มีค่ามากโดยค่าความต่างของอุณหภูมิในช่วง 50-57 องศาเซลเซียส ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจะอยู่ในช่วง 0.42-0.49 โวลต์ ความต่างต่ำที่สุดในช่วง 10-15 องศาเซลเซียส ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกมาจะอยู่ในช่วง 0.02-0.07 โวลต์ และค่าความต่างในช่วงที่น้อยกว่า 9 องศาเซลเซียส ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกมาจะน้อยกว่า 0.02 โวลต์

ตารางที่ 1 ค่าประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

Temp. at Hot side (°C)	Temp. at Cold side (°C)	Recoverable Temp. (ΔT)(°C)	Voltage (V)	Amp (A)
63-57	7-6	57-50	0.49-0.42	0.01
57-50	10-7	49-40	0.42-0.32	0.01
50-43	13-10	39-30	0.32-0.20	0.01
42-35	15-13	29-20	0.20-0.10	0.01
35-33	19-17	19-15	0.10-0.07	0.01
33-29	17-15	15-10	0.07-0.02	0.01
below 29	below 18	less than 9	less than 0.02	0.01

จากตารางที่ 2 ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากแผ่นทองแดงบางขนาด 100 x 150 มิลลิเมตร ซึ่งฝังในก้อนแอสฟัลต์สำหรับทดสอบครึ่งแผ่นทำให้มีพื้นที่สำหรับรับอุณหภูมิของแผ่นทองแดง 100 x 75 ตารางมิลลิเมตร โดยฝังแผ่นทองแดงในความลึก 4 ระดับ คือ 18, 20, 24 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิของแผ่นทองแดงที่วัดได้ ที่มีความเหมาะสมที่สุด จะอยู่ที่ระดับความลึก 20 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิอยู่ที่ 40.75 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับอุปกรณ์หล่อเย็นที่มีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ทำให้มีค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ 13.75 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าออกมาได้ในช่วง 0.02-0.07 โวลต์

ตารางที่ 2 ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสำหรับแผ่นทองแดงขนาด 100 x 150 มม. ที่ความลึกต่างๆ

Depth of Copper plate(mm)	Surface Temp.(°C)	Temp. on Copper plate(°C)	Temp. on Cooling sink(°C)	Recoverable Temp. (ΔT)(°C)
18	45	31.75	27	4.75
20	45	40.75	27	13.75
24	45	35.25	27	8.25
40	45	30.75	27	3.75

จากตารางที่ 3 ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากแผ่นทองแดงบางขนาด 50 x 150 มิลลิเมตร ซึ่งฝังในก้อนแอสฟัลต์สำหรับทดสอบครึ่งแผ่นทำให้มีพื้นที่สำหรับรับอุณหภูมิของแผ่นทองแดง 50 x 75 ตารางมิลลิเมตร โดยฝังแผ่นทองแดงในความลึก 4 ระดับ คือ 15, 33, 37.5 และ 43 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิของแผ่นทองแดงที่วัดได้ ที่มีความเหมาะสมที่สุด จะอยู่ที่ระดับความลึก 15 มิลลิเมตร อุณหภูมิของแผ่นทองแดงที่วัดได้อยู่ที่ 42.25 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับอุปกรณ์หล่อเย็นที่มีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ทำให้มีค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ 15.25 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้า ได้ออกมาในช่วง 0.07-0.1 โวลต์ จึงสามารถกล่าวได้ว่า ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฝังแผ่นทองแดงไม่ควรมีระยะเกิน 20 มิลลิเมตรจากพื้นผิวแอสฟัลต์ เพื่อให้เกิดค่าผลต่างของอุณหภูมิ เพียงพอที่เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (Thermoelectric Generator, TEG) จะสามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ตารางที่ 3 ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสำหรับแผ่นทองแดงขนาด 50 x 150 มม. ที่ความลึกต่างๆ

Depth of Copper plate(mm)	Surface Temp.(°C)	Temp. on Copper plate(°C)	Temp. on Cooling sink(°C)	Recoverable Temp. (ΔT)(°C)
15	45	42.25	27	15.25
33	45	38.50	27	11.5
37.5	45	31.75	27	4.75
43	45	30.50	27	3.50

อ้างอิงจากงานวิจัยของ Yinfei และคณะที่ได้ทำการทดลองในลักษณะเดียวกัน ทำให้ทราบว่าปริมาณของช่องว่างอากาศ (Air Void) เป็นปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิ การที่ชิ้นงานมีค่า Air Void มากจะส่งผลให้มีการคลายความร้อนที่เร็วขึ้น ซึ่งอ้างอิงจากค่า Air Void ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตจะอยู่ที่ไม่เกิน 4% และได้ใช้วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า Air Void ตามการทดลองที่ ทล.-ท. 604/2517 ของกรมทางหลวง ได้ค่าออกมาตามตารางที่ 4 ซึ่งแต่ละก้อนจะมีค่าไม่เกิน 4% ตามที่ได้ทำการควบคุมไว้

ตารางที่ 4 ค่า Air Voids ในก้อนทดสอบแต่ละก้อน

Sample	DOH	GRA1%	GRA2%	STF1%	STF2%
Volume AC(%)	43.525	23.797	42.902	23.842	43.057
Volume Agg (%)	54.169	72.606	53.394	72.741	53.586
VMA (%)	45.831	27.394	46.606	27.259	46.414
Air Voids (%)	2.305	3.597	3.704	3.418	3.357
VFB (%)	94.970	86.870	92.053	87.463	92.768

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้ผลเทอร์โมอิเล็กทริกต่อวัสดุผิวทางโดยมีวัตถุประสงค์ ศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากกระบวนการเทอร์โมอิเล็กทริก วัสดุผสมที่แตกต่างกันมีผลต่อการนำความร้อนของแอสฟัลต์ และศึกษาหาความเป็นไปได้ในการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นพลังงานทดแทน โดยเปรียบเทียบระหว่างก้อนอ้างอิงกรมทางหลวง และก้อนที่ใส่วัสดุผสมอื่นอย่าง แกรไฟต์ และเส้นใยเหล็กปลายตะขอ ค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำความร้อนที่ได้จากการผสม แกรไฟต์ และเส้นใยเหล็กปลายตะขอ จะมีค่าที่สูงขึ้นกว่าก้อนอ้างอิงกรมทางหลวง โดยก้อนที่ผสมแกรไฟต์มีการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่สูงกว่าก้อนที่ผสมเส้นใยเหล็กปลายตะขอ และปริมาณแกรไฟต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 1 ของมวลรวม ให้ค่าการเหนี่ยวนำความร้อนที่สูงกว่าแกรไฟต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ของมวลรวม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะค่า Air Void ของก้อนที่ผสมแกรไฟต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ของมวลรวมมีค่าน้อยกว่า จึงทำให้นำความร้อนได้ดีกว่า ถึงกระนั้นค่าที่ได้ก็ออกมาที่แตกต่างกันเพียงร้อยละ 1.6% และยังคงมากกว่าก้อนอ้างอิงกรมทางหลวงอยู่ถึง 7.2% จากการทดลองพบว่าแกรไฟต์ที่มากไปจะส่งผลในขั้นตอนของการผสมมวลรวมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ เนื่องจากแกรไฟต์จะทำให้มวลรวมความแห้งและไม่เกาะตัวกัน จึงต้องเพิ่มสัดส่วนของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของแอสฟัลต์ได้ การใส่เส้นใยเหล็กปลายตะขอที่อัตราส่วนร้อยละ 1 และ 2 ของมวลรวม มีค่าการเหนี่ยวนำที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยค่าที่ได้ออกมานั้นมากกว่าของก้อนอ้างอิงกรมทางหลวง อยู่ที่ 4.75%

การทดสอบประสิทธิภาพของตัวเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ พบว่าหากต้องการให้สามารถผลิตพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเสถียรที่สุด ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันของแผ่นทองแดง ที่

ทำหน้าที่ถ่ายเทพลังงานความร้อนจากตัวแอสฟัลต์ และอุณหภูมิของอุปกรณ์หล่อเย็น ควรมีค่าน้อยสุดที่ 10 องศาเซลเซียส จะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0.02 โวลต์ และมีค่ากระแสอยู่ที่ 0.01 แอมป์

ในการทดลองติดตั้งแผ่นทองแดง 2 ขนาดที่ความลึกแตกต่างกัน สามารถสรุปได้ว่ายิ่งแผ่นทองแดงใกล้กับพื้นผิวที่รับความร้อนมากขึ้น พลังงานที่ถ่ายเทมาจากตัวแอสฟัลต์ก็จะส่งผ่านไปยังแผ่นทองแดงได้มากขึ้น และยังแผ่นทองแดงมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นก็จะทำให้มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่มากขึ้นด้วย โดยความลึกของแผ่นทองแดงที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดและไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานของพื้นผิว จะอยู่ระหว่าง 15-20 มิลลิเมตร จากพื้นผิว

5. ข้อเสนอแนะ

ค่าที่ได้จากการผสมแกรไฟต์และเส้นใยเหล็กปลายตะขอ จะได้ค่าการเหนียวนำความร้อนที่สูงขึ้นกว่าก่อนมาตรฐานกรมทางหลวง โดยก่อนที่ผสมแกรไฟต์มีการเหนียวนำไฟฟ้าที่สูงกว่าก่อนที่เส้นใยเหล็กปลายตะขอ และปริมาณแกรไฟต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 1 ของมวลรวม ให้ค่าการเหนียวนำความร้อนที่สูงกว่าแกรไฟต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ของมวลรวม ซึ่งอัตราส่วนของแกรไฟต์ที่เหมาะสมไม่ควรเกินร้อยละ 2 ของมวลรวม เนื่องจากแกรไฟต์จะทำให้มวลรวมมีความแห้ง และไม่เกาะตัวกัน จึงต้องเพิ่มสัดส่วนของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของแอสฟัลต์ได้ การใส่เส้นใยเหล็กปลายตะขอที่อัตราส่วนร้อยละ 1 และ 2 ของมวลรวม มีค่าการเหนียวนำที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ การทดลองหาค่าประสิทธิภาพของตัวเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ทำให้สามารถคาดคะเน แนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง จากตารางที่ 5 จำนวนของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ที่ต่อแบบอนุกรมกัน โดยในนี้ทำการจำลองสถานการณ์ให้มีการนำพลังงานไปใช้กับหลอดไฟ LED ขนาด 250W ซึ่งเปรียบกับไฟส่องสว่างบนถนนเป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าต้องใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ประมาณ 714,000 ตัว ต่อไฟส่องสว่าง 1 ดวง หากเทียบเป็นพื้นที่ จะใช้พื้นที่ประมาณ 1,140 ตารางเมตร ในการติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์และหากเพิ่มจำนวนเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ต่อวงจรมากขึ้น ก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้า มากขึ้นเช่นกัน แม้การต่อแบบอนุกรม ยังมีจำนวนเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์มาก จะให้แรงดันไฟฟ้ามากขึ้น แต่พลังงานไฟฟ้าสุทธิที่ได้ยังคงเท่ากัน และสิ่งที่ควรคำนึงถึงอีกข้อคือ การรักษาและการซ่อมบำรุงเมื่อเกิดการชำรุด การต่อแบบอนุกรมจำนวนมากหากมีความเสียหายเกิดขึ้นที่เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เพียง 1 ชิ้น จะทำให้ทั้งวงจรมันไม่สามารถผลิตพลังงานได้ ดังนั้นจึงควรเลือกและพิจารณาถึงความสามารถในการซ่อมบำรุงและ ดูแลรับผิดชอบในแต่ละพื้นที่ที่นำไปติดตั้งด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 5 จำนวนเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ต่อ 1 วงจร กับการนำพลังงานไปใช้

Num. of TEG per	Volts per Unit	Amp	Watt-hr in 1 hr per Unit	Time(Hrs)	Total Watt-hr/Unit	Num. of Unit operated
1	0.07	0.01	0.0007	5	0.0035	714,286
4	0.28		0.0028		0.0140	178,571
9	0.63		0.0063		0.0315	79,365

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาจาก โครงการหลักสูตรนวัตกรรมทางวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Correia, D. and Ferreira, A. (2021). Energy Harvesting on Airport Pavements: State-of-the-Art. *Sustainability*, 13(11), 5893.
- [2] Lee, Jae Jun., Kim, Dae Hun., Lee, Seung Tae. and Lim, Jae Kyu. (2014). Fundamental Study of Energy Harvesting using Thermoelectric Effect on Concrete Structure in Road. *Advanced Materials Research*, 1044-1045, pp.332-337.
- [3] Datta, U., Dessouky, S. and Papagiannakis, A.T. (2018). Harvesting Thermoelectric Energy from Asphalt Pavements. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2628(1).
- [4] สำนักงานบริหารบำรุงทาง กรมทางหลวง. (2022). บัญชีทะเบียนทางหลวงจำแนกประเภทจำนวนหลักทางหลวงตามสำนักงานทางหลวงทั่วประเทศ.
- [5] Mona, Y., Jitsangiam, P. and Punyawudho, K. (2021). A comparison of energy harvesting from cement and asphalt on road pavement using thermoelectric module. *6th International Conference on Advances on Clean Energy Research*, ICACER 2021 April 15-17, 2021, Barcelona, Spain, pp.225-229.
- [6] กรมทางหลวง. (2013). มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีตปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ. มาตรฐานที่ ทล.-ม. 416/2556.
- [7] Yinfei, D., Jiacheng, W., Haibin, D., Yingchen, L., Jun, T., and Xiaowei, W. (2021). Using steel fibers to accelerate the heat conduction in asphalt mixture and its performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 282.