

การทดลองผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งของน้ำหล่อเย็นมอเตอร์ไซค์โดยใช้ เทอร์โมอิเล็กทริกส์

Experimental investigation of electricity generation from motorcycle coolant waste
heat using thermoelectric modules

พชร เจริญดี¹, ชัยยศ ดำรงกิจโกศล^{1*}, ปรีดา จันทวงษ์¹ และ ภาณุวัฒน์ จันทร์มาก²

Pachara Charoendee¹, Chaiyot Damrongkijkosol^{1*}, Preeda Chantawong¹ and Panuwat Chanmak²

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งของน้ำหล่อเย็นในรถจักรยานยนต์ภายใต้สภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน โดยใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์ (thermoelectric generator: TEG) ซึ่งสามารถแปลงพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง การทดลองใช้รถจักรยานยนต์รุ่น Honda Rebel 300 ติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกส์จำนวน 5 แผ่น บนชุดต้นแบบที่เชื่อมต่อกับระบบน้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์ การทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วนคือการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่องไดนาโมมิเตอร์ และการทดลองวิ่งบนถนนจริง โดยควบคุมตัวแปรด้านความเร็ว (40, 60 และ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และภาระ (200 และ 300 นิวตัน) ผลการทดลองพบว่าแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกส์สามารถผลิตไฟฟ้าได้จริง โดยให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 0.82W ประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบอยู่ระหว่างร้อยละ 0.526 ถึง 0.672 ซึ่งแปรผันตามความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกส์ ข้อมูลจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากน้ำหล่อเย็นรถจักรยานยนต์กลับมาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

คำสำคัญ: ความร้อนเหลือทิ้ง, น้ำหล่อเย็น, เทอร์โมอิเล็กทริกส์, รถจักรยานยนต์, การผลิตไฟฟ้า

Abstract

This research investigated the performance of electricity generation system using a thermoelectric generator (TEG) that directly converted motorcycle engine coolant waste heat into electricity under varying operating conditions. The experimental setup utilized a Honda Rebel 300 motorcycle with 5 TEG modules, which was installed with a prototype system connecting to the engine's cooling circuit. Experiments were conducted both in laboratory tests using a dynamometer, and in real-world road tests at vehicle speeds of 40, 60, and 80km/h under loads of 200 and 300N. The results demonstrated the successful generation of electricity by the TEG modules, with a maximum power output of approximately 0.82W. The average system efficiency ranged from 0.526% to 0.672%, correlating with the temperature difference across the hot and cold sides of the TEG modules. This study highlights the potential for motorcycle coolant waste heat recovery and its subsequent utilization.

Keywords: waste heat, coolant, thermoelectric, motorcycle, electricity generation

¹ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

¹ College of Industrial Technology, King Mongkut University of Technology North Bangkok, Bang Sue, Bangkok 10800, Thailand

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ อำเภอนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี 11000

² Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Mueang Nonthaburi District, Nonthaburi 11000, Thailand

* Corresponding Author, E-mail: chaiyot.d@cit.kmutnb.ac.th

บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานในภาคขนส่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในยานยนต์ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้ง (waste heat recovery) กลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากในระบบการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน พลังงานความร้อนส่วนใหญ่จะสูญเสียไปในรูปของความร้อนทิ้งผ่านระบบระบายความร้อนและไอเสีย ซึ่งหากสามารถกู้คืนและเปลี่ยนผ่านพลังงานความร้อนหลงเหลือเหล่านี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ จะเป็นแนวทางสำคัญในการช่วยแบ่งเบาภาระของเครื่องยนต์หลัก (load reduction) ช่วยลดภาระของระบบประจุไฟ และเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมของเครื่องยนต์ (overall thermal efficiency) ตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน ดังที่ Prudhvi et al., (2013) ได้กล่าวถึงความสำคัญของระบบหล่อเย็นในยานยนต์ที่เป็นแหล่งพลังงานความร้อนศักยภาพสูงที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกู้คืนพลังงานได้ เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric technology) จึงเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพสูงในการเปลี่ยนผ่านพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยอาศัยหลักการทางกายภาพที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) ซึ่งระบุว่า เมื่อมีการสร้างความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างรอยต่อของวัสดุต่างชนิดกัน หรือวัสดุกึ่งตัวนำชนิด p และชนิด n (temperature gradient: $\Delta T = T_h - T_c$) จะส่งผลให้พาหะนำไฟฟ้า (charge carriers) ภายในโครงสร้างวัสดุเกิดการแพร่กระจายและเคลื่อนที่จากด้านที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ (cold side) ก่อให้เกิดความต่างศักย์และแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force: V) ขึ้นในระบบ โดยกลไกดังกล่าวทำให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงโดยไม่ต้องพึ่งพาชิ้นส่วนเคลื่อนไหวใด ๆ และต้องการการบำรุงรักษาน้อย เทคโนโลยีนี้ได้รับความสนใจศึกษาอย่างกว้างขวางในหลายบริบท อาทิ การผลิตไฟฟ้าจากเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์โดย Sarayoot & Worawit (2018) การประยุกต์ใช้กับเครื่องปรับอากาศโดย Thongkulphat & Srithanauthaikorn (2017) การกู้คืนพลังงานจากกระบวนการผลิตนมโดย Sisamoe & Chaktranond (2021) รวมถึงการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนบนหลังคาบ้านโดย Kaewkalaya et al., (2023) และการใช้น้ำร้อนจากท่อส่งน้ำโดย Surinarin et al., (2024) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกโดย Plerdpring & Boonpichayapa (2016) และการวิเคราะห์ผลกระทบของความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิโดย Admasu et al., (2013) สำหรับการประยุกต์ใช้ในยานยนต์ Ambulkar et al., (2024) ได้ศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากไอเสียของรถจักรยานยนต์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการเลือกใช้อุปกรณ์ระบายความร้อนที่เหมาะสมตามที่ Bamrungran & Lertsatitthanakorn (2018) รวมถึง Mousa & Hegazi (2018) ได้เสนอแนะไว้ อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกกับน้ำหล่อเย็นของรถจักรยานยนต์ยังมีความท้าทายในด้านการออกแบบชุดแลกเปลี่ยนความร้อน ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญในการศึกษาและสร้างชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งของน้ำหล่อเย็นโดยใช้รถจักรยานยนต์ Honda Rebel 300 เป็นกรณีศึกษา โดยกำหนดให้ตัวแปรต้น (independent variables) ในการศึกษา ได้แก่ ความเร็วในการขับขี่ (40, 60 และ 80) กิโลเมตรต่อชั่วโมง และภาระกระทำของเครื่องยนต์ (ภาระ หรือ load) (200 และ 300 นิวตัน) ส่วนตัวแปรตาม (dependent variables) ได้แก่ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก (TEG) แรงดันไฟฟ้า (V) กระแสไฟฟ้า (A) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (%) โดยมีตัวแปรควบคุม ได้แก่ จำนวนโมดูล TEG (5 แผ่น) และรูปแบบการต่อวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม โดยนอกเหนือจากการทดสอบสมรรถนะทางเทอร์โมไดนามิกส์แล้ว การศึกษานี้ยังครอบคลุมไปถึงการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของชุดต้นแบบ

วิธีการศึกษา

การศึกษานี้มุ่งเน้นการทดสอบสมรรถนะของชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้ง โดยดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ chassis dynamometer มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งมีรายละเอียดและเงื่อนไขการทดสอบดังนี้

1. วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือวัด

ชุดต้นแบบประกอบด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก จำนวน 5 แผ่นต่ออนุกรมกัน โดยใช้ TEG รุ่น SP1848 – 27145 เนื่องจากมีความทนทานต่ออุณหภูมิด้านร้อนต่อเนื่องได้สูงและมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเครื่องยนต์ โดยโมดูลดังกล่าวมีขีดความสามารถ (capacity) ในการให้กระแสไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 669mA และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 4.80V เมื่อมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและเย็น หรือผลต่างอุณหภูมิ (ΔT) ที่ 100°C ติดตั้งร่วมกับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนอลูมิเนียม โดยใช้เครื่องมือวัดเป็นมัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล ซึ่งมีความแม่นยำประมาณ $\pm(0.5\%$ ของค่าที่อ่านได้ +2 หลัก) และเทอร์มิสเตอร์แบบดิจิทัล ซึ่งมีค่าความแม่นยำ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองได้รับการตรวจสอบความถูกต้องในเบื้องต้นโดยเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการวัด ก่อนนำอุปกรณ์ทั้งหมดไปติดตั้งเข้ากับรถจักรยานยนต์ Honda Rebel 300 ที่ใช้เครื่องยนต์เบนซินขนาด 300CC ที่ใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

2. สภาพะการทดลองและขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งจากน้ำหล่อเย็นรถจักรยานยนต์จะแบ่งการทดสอบออกเป็นทั้งหมด 7 การทดสอบ โดยแบ่งเป็น 6 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และ 1 การทดสอบบนถนนจริง โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทดสอบโดยนำรถจักรยานยนต์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ต้นแบบไปติดตั้งบน chassis dynamometer ดัง (Figure 1) ซึ่งรายละเอียดของการติดตั้งอุปกรณ์ต้นแบบเข้ากับรถจักรยานยนต์ ดัง (Figure 2) โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะทดสอบที่ความเร็วเท่ากับ 40, 60 และ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งในแต่ละความเร็วจะทดสอบที่ภาระแตกต่างกัน โดยทดสอบที่ 200 และ 300 นิวตัน ในด้านการทดสอบบนถนนจริง (road test) ทำการทดสอบที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยทุกการทดสอบจะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิในตำแหน่งต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิฝั่งร้อนและฝั่งเย็นของ TEG เพื่อนำไปคำนวณค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยกำหนดให้มีการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้งในทุกสภาวะทดสอบ เพื่อนำค่าเฉลี่ยมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง



Figure 1 Experimental setup and instrumentation of the motorcycle using a dynamometer.

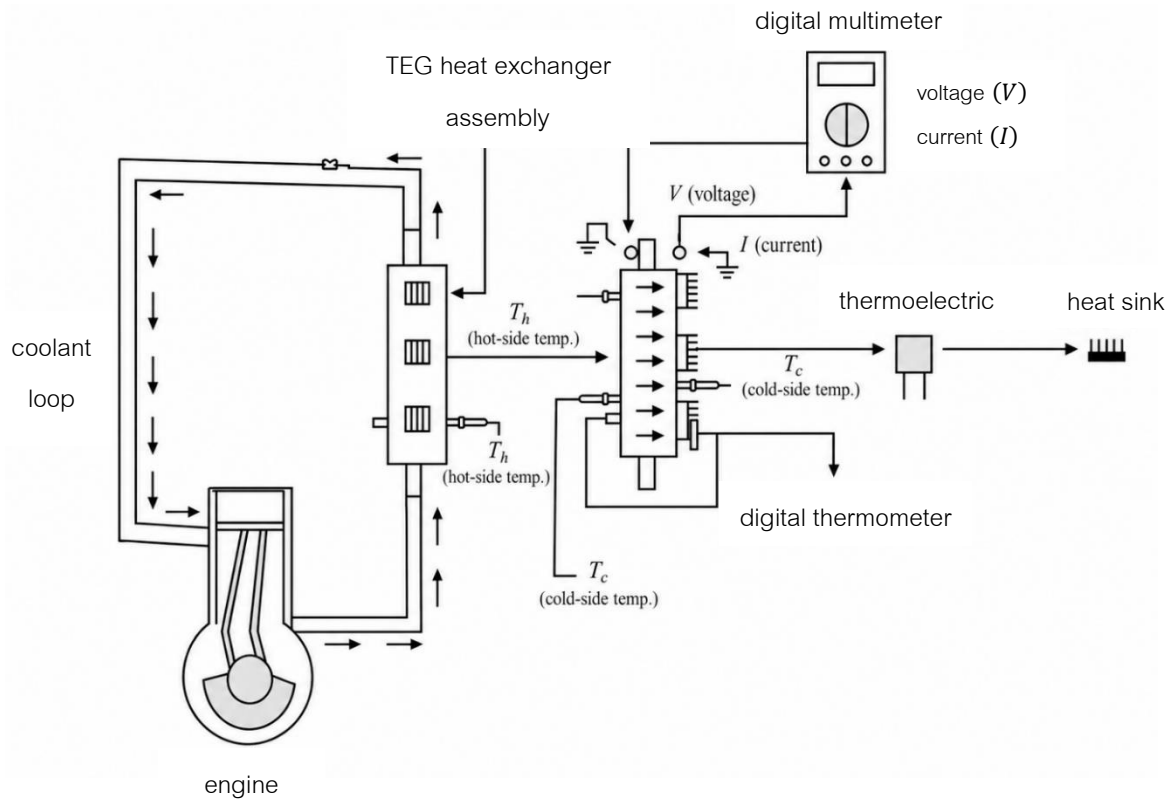


Figure 2 Installation of a thermoelectric power generation experimental set.

จาก (Figure 2) แสดงผังโครงสร้างและการติดตั้งอุปกรณ์ของชุดต้นแบบระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนกลับคืน (waste heat recovery system) โดยทำการติดตั้งโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric module) ประกอบอยู่ระหว่างชุดแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งรับพลังงานจากระบบหล่อเย็นของเครื่องยนต์เพื่อทำหน้าที่เป็นด้านอุณหภูมิสูง (hot side) และแผ่กระจายความร้อนเพื่อทำหน้าที่เป็นด้านอุณหภูมิต่ำ (cold side) การจัดวางลักษณะนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างผลต่างอุณหภูมิ (ΔT) สำหรับเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าผ่านปรากฏการณ์ซีเบค โดยสภาวะการทดสอบจะถูกควบคุมและบันทึกข้อมูลด้วยเทอร์มิสเตอร์ดิจิทัลเพื่อวิเคราะห์การไหลของความร้อน และใช้มัลติมิเตอร์ในการตรวจวัดสมรรถนะทางไฟฟ้าเพื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการแปรเปลี่ยนพลังงานภายใต้สภาวะการทำงานที่กำหนด

เพื่อให้การศึกษามรรณะของชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งของน้ำหล่อเย็นเป็นไปอย่างมีระบบ คณะผู้วิจัยได้ทำการจัดหมวดหมู่พารามิเตอร์และสภาวะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองอย่างครอบคลุม โดยกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ตัวแปรต้น (independent variables) คือ ความเร็วในการขับเคลื่อนและภาระของเครื่องยนต์ เพื่อจำลองสภาวะโหลดบนเครื่องไดนาโมมิเตอร์ ตัวแปรตาม (dependent variables) คือ พารามิเตอร์ทางอุณหภูมิและทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะของเครื่องยนต์ เช่น ผลต่างอุณหภูมิ (ΔT) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (P_{out}) และประสิทธิภาพระบบ (η) และ ตัวแปรควบคุม (controlled variables) เพื่อควบคุมเสถียรภาพของการทดสอบ ได้แก่ จำนวนโมดูล TEG และประเภทเครื่องยนต์ รายละเอียดพารามิเตอร์และสภาวะที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดได้ดัง (Table 1)

ในการศึกษามรรณะของชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งของน้ำหล่อเย็น ผู้วิจัยได้ทำการจัดหมวดหมู่พารามิเตอร์และสภาวะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองอย่างเป็นระบบ เพื่อให้ครอบคลุมปัจจัยที่มีผลต่อการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย:

- ตัวแปรต้น (independent variables) ความเร็วในการขับขี่ (vehicle speed) ที่ระดับ 40, 60 และ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และภาระของเครื่องยนต์ (engine load หรือ ภาระ) ที่ระดับ 200 และ 300 นิวตัน เพื่อจำลองสภาวะในห้องปฏิบัติการบนเครื่องไดนาโมมิเตอร์ และการทดสอบวิ่งบนถนนที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

- ตัวแปรตาม (dependent variables) อุณหภูมิฝั่งร้อน (T_h), อุณหภูมิฝั่งเย็น (T_c), ผลต่างอุณหภูมิ (ΔT), แรงดันไฟฟ้า (V), กระแสไฟฟ้า (I), กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P_{out}) และประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ (η)

- ตัวแปรควบคุม (controlled variables) จำนวนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกส์ (TEG) คงที่จำนวน 5 โมดูล ต่อเชื่อมแบบอนุกรม และเครื่องยนต์ขนาดความจุ 300CC ระบายความร้อนด้วยน้ำ

Table 1 Summary of experimental variables.

variable category	parameter	description / value
independent	speed	40, 60, 80km/h
independent	(load)	200, 300N
dependent	hot-side temp. (T_h)	measured ($\pm 0.5^\circ\text{C}$)
dependent	cold-side temp. (T_c)	measured ($\pm 0.5^\circ\text{C}$)
dependent	temp. difference (ΔT)	calculated ($T_h - T_c$)
dependent	voltage (V)	measured ($\pm 0.5\%$)
dependent	power output (P_{out})	calculated ($V \times I$)
dependent	system efficiency (η)	calculated (%)
controlled	TEG module count	5 modules (series)
controlled	engine type	300 water-cooled

3. สมการการวิเคราะห์ภาระ และประสิทธิภาพของชุดต้นแบบ

จากข้อมูลรายละเอียดสภาวะการทดสอบข้างต้นคณะผู้วิจัยได้กำหนดความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์ทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย ตัวแปรต้น (independent variables) ได้แก่ ความเร็วในการขับขี่ (vehicle speed) ที่ระดับ 40, 60 และ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และภาระของเครื่องยนต์ (engine load หรือ ภาระ) ที่ระดับ 200 และ 300 นิวตัน ส่วนตัวแปรตาม (dependent variables) ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์ทางความร้อน (อุณหภูมิฝั่งร้อน T_h อุณหภูมิฝั่งเย็น T_c และผลต่างอุณหภูมิ ΔT) รวมถึงพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและสมรรถนะ (แรงดันไฟฟ้า V กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ P_{out} และประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ η) สำหรับการทดสอบในสภาวะภาคสนามหรือการวิ่งบนถนนจริง (road test) คณะผู้วิจัยได้กำหนดให้มีการคำนวณ ภาระ ที่ใช้ทำการทดสอบ road test หรือภาระแรงต้านรวมของรถจักรยานยนต์ (F_{total}) เพื่อวิเคราะห์ภาระหรือแรงต้านการเคลื่อนที่จริงที่รถมอเตอร์ไซด์ต้องรับขณะเคลื่อนที่บนถนนจริง โดยสมการที่ใช้คำนวณค่าแรงต้านที่เกิดขึ้นของรถจักรยานยนต์ ดังสมการ (1)

$$F_{total} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 + C_{rr} m g \quad (1)$$

โดยที่

F_{total} คือ ภาระแรงต้านรวมของรถจักรยานยนต์ มีหน่วยเป็นนิวตัน

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (drag coefficient) กำหนดใช้เท่ากับ 0.80

ซึ่งมีความสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของรถจักรยานยนต์สไตล์ครุยเซอร์ (cruiser-style) ที่ผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ขนาดกลางที่มีลักษณะพาด้านแบบหลังตรง (Cossalter, 2006)

- A คือ พื้นที่หน้าตัดของรถรวมคนขับ เท่ากับ 0.65 ตารางเมตร (m^2) (Barnard, 2001)
- v คือ ความเร็วรถจักรยานยนต์ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)
- C_r คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของยาง (rolling resistance coefficient) เท่ากับ 0.015 (Gillespie, 1992)
- m คือ น้ำหนักรวมของตัวรถและคนขับ เท่ากับ 252 กิโลกรัม (kg)
(คำนวณจากน้ำหนักตัวรถจักรยานยนต์ 172 กิโลกรัม รวมกับน้ำหนักผู้ขับขี่ 80 กิโลกรัม)
- g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก เมตรต่อวินาทีกำลังสอง (m/s^2)

ในด้านการหาประสิทธิภาพของชุดต้นแบบจะเริ่มจากคำนวณอัตราความร้อนประสิทธิภาพ หรือ Q_{in} ที่ผ่านเข้าชุดต้นแบบ โดยอ้างอิงตาม กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of heat conduction) ภายใต้แบบจำลองการนำความร้อนเชิงหนึ่งมิติ เพื่อประเมินปริมาณพลังงานความร้อนที่ไหลผ่านชุดโมดูลสำเร็จรูป ดังสมการ (2)

$$Q_{in} = \frac{k_{eff} A \Delta T}{d} \quad (2)$$

โดยที่

- Q_{in} คือ อัตราการไหลของความร้อนเข้าสู่ด้านร้อนของโมดูล มีหน่วยเป็นวัตต์
- k_{eff} คือ ค่าการนำความร้อนประสิทธิภาพของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกส์ โดยรวม เท่ากับ 1.10 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน $W/m \cdot K$ (Rowe, 2018)
- A คือ พื้นที่หน้าสัมผัสรวมของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก เท่ากับ 0.008 ตารางเมตร (m^2)
- d คือ ความหนาของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก เท่ากับ 0.0034 เมตร (m)

หลังจากประเมินอัตราความร้อนที่ผ่านชุดต้นแบบถูกประเมินจากสมการ (2) คณะผู้วิจัยจะนำค่าที่ได้ไปใช้เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานความร้อนประสิทธิภาพรวมของระบบ (system-level conversion efficiency: η) ดังสมการ (3)

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{Q_{in}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

โดยที่

- η คือ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าของชุดต้นแบบ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)
- P_{out} คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ระบบต้นแบบผลิตได้จริง มีหน่วยเป็นวัตต์
- Q_{in} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ด้านร้อนของโมดูล มีหน่วยเป็นวัตต์

4. การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเชิงเศรษฐศาสตร์เนื้อหาในส่วนนี้คณะผู้วิจัยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนรวมในการจัดสร้างชุดทดสอบต้นแบบ (initial investment) และมูลค่าผลประโยชน์ตอบแทนทางพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยเทียบเป็นการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง เพื่อดำเนินการหาระยะเวลาคืนทุนขั้นต้น (payback period: PB) โดยสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังสมการ (4)

$$PB = \frac{C_{total}}{S_{annual}} \quad (4)$$

โดยที่

PB คือ ระยะเวลาคืนทุน มีหน่วยเป็นปี
 C_{total} คือ ต้นทุนค่าวัสดุและอุปกรณ์รวมในการจัดสร้างชุดต้นแบบ มีหน่วยเป็นบาท (Baht)
 S_{annual} คือ มูลค่าพลังงานหรือค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้ทางอ้อมต่อปี มีหน่วยเป็นบาทต่อปี

ผลการศึกษา

ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าของความร้อนที่ได้จากความร้อนเหลือทิ้งของน้ำหล่อเย็นมอเตอร์ไซค์โดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกส์ การทดลองนี้ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ (TEGs) จากความร้อนเหลือทิ้งของน้ำหล่อเย็นในรถจักรยานยนต์ โดยมีการติดตั้ง (TEGs) จำนวน 5 แผ่น และทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ของความเร็ว 40, 60 และ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และภาระที่แตกต่างกัน (200 และ 300) นิวตัน รวม 6 รอบในห้องปฏิบัติการและ 1 รอบการทดสอบจริงบนถนนที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดย (Table 2) และ (Figure 3) แสดงผลการทดลองการผลิตไฟฟ้าของชุดต้นแบบจากการทดลอง 7 สภาวะที่ความเร็วและภาระแตกต่างกัน

Table 2 Results of all 7 experimental trials.

trial	speed (km/h)	load (N)	ΔT (°C)	power (W)	estimated efficiency (%)
1	40	200	37.48	0.51	0.526
2	40	300	39.54	0.56	0.547
3	60	200	42.51	0.65	0.591
4	60	300	44.84	0.71	0.612
5	80	200	45.63	0.75	0.635
6	80	300	47.12	0.82	0.672
7	80 (road test)	194.34	41.50	0.66	0.605

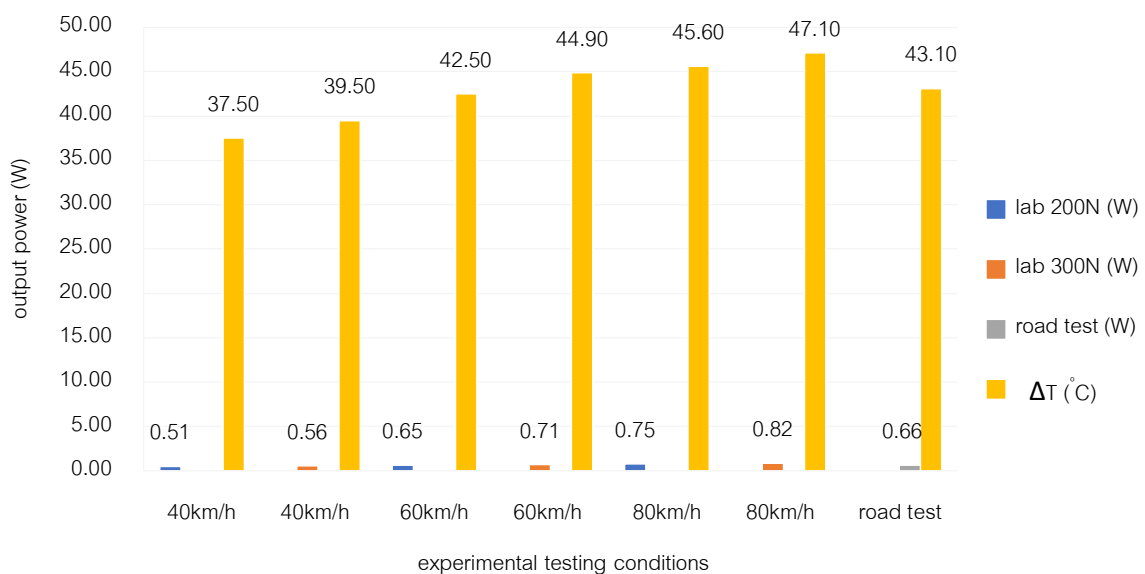


Figure 3 ΔT vs. power under different speed and load conditions in laboratory and real-world road tests.

1. ความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของชุดต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก

ผลการทดสอบจาก (Table 2) แสดงให้เห็นว่าชุดต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถแปรเปลี่ยนพลังงานความร้อนส่วนเกินจากระบบหล่อเย็นให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง โดยแปรผันตามสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ โดยพบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้นแบบผลิตได้คือ 0.82 วัตต์ จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่สภาวะความเร็วคงที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/h) ที่ภาระ 300 นิวตัน โดยมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น (ΔT) เท่ากับ 47.12°C โดยมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า (conversion efficiency) อยู่ที่ร้อยละ 0.67 ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาความสามารถเฉลี่ยต่อหน่วยโมดูลที่สภาวะดังกล่าวจะคิดเป็นกำลังไฟฟ้าประมาณ 162 มิลลิวัตต์ (mW) ต่อ TEG 1 แผ่น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบในการกู้คืนพลังงานความร้อนทิ้งระดับต่ำ (low-grade waste heat) เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เป็นประโยชน์ได้จริง โดยผลกระทบของความเร็วในการขับเคลื่อนของรถจักรยานยนต์มีผลโดยตรงต่อปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็น 60 และ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วที่สูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเพิ่มขึ้นทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้การแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถผลิตได้อยู่ที่ 0.82 วัตต์ ภายใต้เงื่อนไขความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และภาระ 300 นิวตัน ขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุดอยู่ที่ 0.51 วัตต์ ภายใต้เงื่อนไขความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และภาระ 200 นิวตัน ความแตกต่างของกำลังไฟระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุดคิดเป็น 0.44 วัตต์ หรือร้อยละ 118.90 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความเร็วมีผลโดยตรงต่อปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ เช่นเดียวกับผลกระทบของภาระในการขับเคลื่อนที่อิทธิพลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกเช่นกัน เนื่องจากเมื่อเพิ่มภาระจาก 200 เป็น 300 นิวตัน เครื่องยนต์มีการทำงานหนักขึ้น ส่งผลให้อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และทำให้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกส่งผลให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น โดยผลการทดลองพบว่าที่ภาระ 300 นิวตัน สามารถผลิตไฟฟ้าโดยมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงกว่าที่ภาระ 200 นิวตัน ทุกความเร็วขับเคลื่อน (Table 2) และ (Figure 3) พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้นแบบผลิตได้คือ 0.82 วัตต์ ที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และภาระ 300 นิวตัน โดยมีค่า ΔT เท่ากับ 47.12°C และมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานร้อยละ 0.67 และเนื่องจากบริเวณพื้นที่ผิวหน้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกทั้ง 5 แผ่นมีการกระจายตัวของความร้อนทางด้านผิวฝั่งร้อนสม่ำเสมอ ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (power density) จะมีค่าเฉลี่ยคงที่ตลอดหน้าสัมผัส ส่งผลให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงแปรผันตรงตามกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.51 วัตต์ ซึ่งพบจากการทดสอบ (trial 1) โดยมีค่า ΔT เพียง 37.48°C โดยผลการศึกษาพบว่าแนวโน้มความเร็วในการขับเคลื่อนที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่า ΔT เพิ่มขึ้น และส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ning et al., (2014) และ Kaewkalaya et al., (2023) นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างอุณหภูมิ และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ผลิตได้จากชุดต้นแบบระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนกลับคืน (waste heat recovery system) ภายใต้สภาวะการทดสอบต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่มีผลต่อสมรรถนะทางไฟฟ้า ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่า กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (output power) มีพฤติกรรมแปรผันตรงตามการเพิ่มขึ้นของผลต่างอุณหภูมิ ระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นที่ตกคร่อมโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งเป็นไปตามหลักการของปรากฏการณ์ซีเบค เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเร็วในการขับเคลื่อน (vehicle speed) พบว่าปริมาณความเร็วมีความเชื่อมโยงโดยตรงต่อระดับพลังงานความร้อนสะสมและการระบายความร้อน โดยที่สภาวะความเร็วต่ำคงที่ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ค่า ΔT สะสมจะอยู่ในช่วงต่ำสุดระหว่าง $37.48\text{--}39.54^{\circ}\text{C}$

ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตอยู่ในเกณฑ์ต่ำสุดเช่นกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.51-0.56 วัตต์ อย่างไรก็ตาม เมื่อปรับเพิ่มความเร็วขึ้นเป็น 60 และ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ช่วงของค่า ΔT ได้ขยับตัวสูงขึ้น ซึ่งกระตุ้นให้ระดับการผลิตกำลังไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากรอบเครื่องยนต์ที่สูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นฝั่งร้อนสูงขึ้น ประกอบกับความเร็วลมปะทะที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วรถช่วยเร่งอัตราการระบายความร้อนที่ฝั่งเย็น (cold side) ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของภาระเครื่องยนต์ (engine load) ภายใต้ระดับความเร็วเดียวกัน พบว่าการเพิ่มภาระโหลดของเครื่องยนต์จาก 200 เป็น 300 นิวตัน ส่งผลให้ผลต่างอุณหภูมิและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มภาระส่งผลให้เครื่องยนต์มีการทำงานที่หนักขึ้นและส่งผ่านพลังงานความร้อนทั้งสู่น้ำหล่อเย็นในปริมาณที่สูงขึ้น จากพฤติกรรมดังกล่าวส่งผลให้ระบบต้นแบบที่ใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกส์ จำนวน 5 แผ่นต่ออนุกรมกัน สามารถแสดงขีดความสามารถและสมรรถนะสูงสุดได้ ณ สภาวะความเร็วขับที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภายใต้ภาระเครื่องยนต์ 300 นิวตัน โดยมีผลต่างอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 47.12°C ซึ่งสามารถแปรเปลี่ยนพลังงานความร้อนเหลือทิ้งเป็นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้สูงที่สุดเท่ากับ 0.82 วัตต์ ดัง (Figure 4)

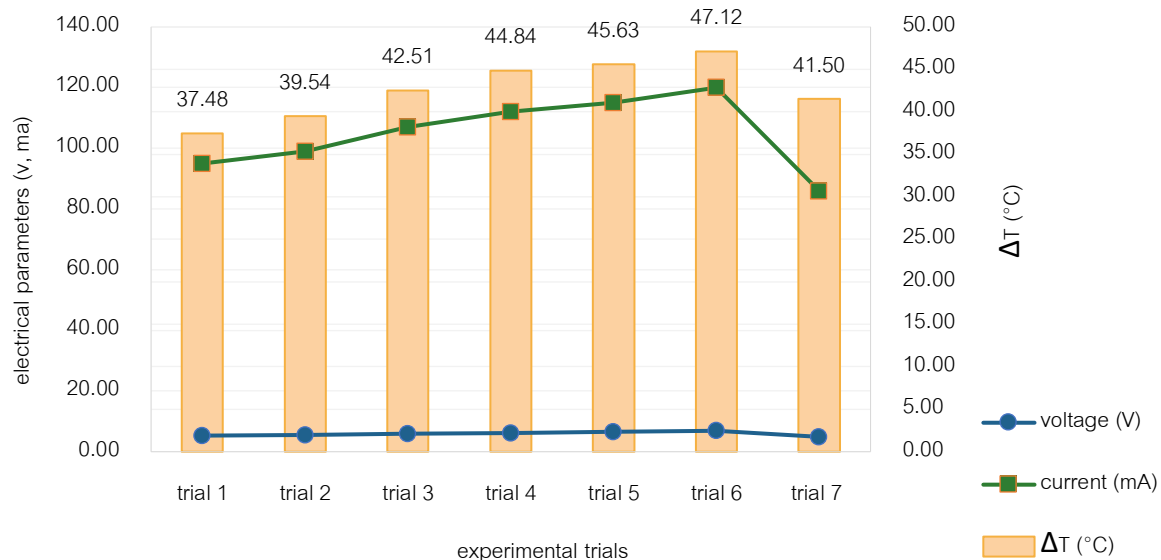


Figure 4 Electrical parameters and power output across 7 trials.

จาก (Figure 4) แสดงผลการทดสอบความสัมพันธ์เชิงสมรรถนะระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจร (voltage: V) และกระแสไฟฟ้า (current: A) ที่ผลิตได้จากระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (TEG) ภายใต้สภาวะการแปรเปลี่ยนความเร็วในการขับที่ (40, 60 และ 80) กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภาระของเครื่องยนต์ 200 และ 300 นิวตัน และการทดสอบภาคสนามจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (trials 1-6) พบว่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากชุดต้นแบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ขณะที่การทดสอบภาคสนาม (trials 7) ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าต่ำกว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ความเร็วทดสอบเดียวกัน ซึ่งจากผลการทดลองใน (Table 2), (Figure 3) และ (Figure 4) สามารถวิเคราะห์และอธิบายพฤติกรรมของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้เป็นประเด็นสำคัญดังนี้

1. ผลกระทบของความเร็วในการขับต่อกระแสและแรงดันไฟฟ้า

พฤติกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกในทุกสภาวะการทดสอบ มีแนวโน้มสอดคล้องตามทฤษฎีทางอุณหพลศาสตร์ กล่าวคือ แรงดันไฟฟ้ามีลักษณะลดลงเป็นเส้นตรงเชิงปฏิกิริยาผกผัน

(linear inverse variation) กับกระแสไฟฟ้าในวงจร ซึ่งเกิดจากผลกระทบของความต้านทานภายใน (internal resistance) ของสารกึ่งตัวนำในโมดูลเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรปิด อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาระดับของเส้นกราฟพาราเมเตอร์ทางไฟฟ้าใน (Figure 4) พบว่าเมื่อความเร็วในการขับเคลื่อนเพิ่มขึ้นจาก 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ไปจนถึง 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เส้นกราฟความสัมพันธ์จะยกตัวสูงขึ้นทั้งระบบ (shift upwards) เนื่องจากความเร็วที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เครื่องยนต์มีการเผาไหม้และปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาสะสมในระบบน้ำหล่อเย็นมากขึ้น ส่งผลให้ผลต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น (ΔT) ขยายกว้างขึ้นจาก 37.48°C (ที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภาระ 200 นิวตัน ขึ้นไปเป็น 47.12°C (ที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภาระ 300 นิวตัน ซึ่งการเพิ่มความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นแรงขับเคลื่อนทางเทอร์โมไดนามิกส์ให้เกิดแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด และกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นตามปรากฏการณ์ซีเบค นอกจากนี้ การที่ความเร็วรถเพิ่มขึ้นยังมีความเชื่อมโยงโดยตรงต่อระดับพลังงานความร้อนสะสมและการระบายความร้อน โดยรอบเครื่องยนต์ที่สูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นฝั่งร้อน สูงขึ้น ประกอบกับความเร็วลมปะทะที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วรถในสภาวะขับเคลื่อนจริง จะช่วยเร่งอัตราการระบายความร้อนที่ฝั่งเย็น (cold side) ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ส่งผลเชิงบวกโดยตรงต่อขีดความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยแปรเปลี่ยนพฤติกรรมออกมาในรูปของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดที่ระบบสามารถผลิตได้ ซึ่งเพิ่มขึ้นตามลำดับความเร็วจากช่วง 0.51-0.56 วัตต์ ที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ขยับขึ้นเป็น 0.65-0.71 วัตต์ ที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และขึ้นสู่ระดับสูงสุดที่ 0.75-0.82 วัตต์ ที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พฤติกรรมการยกตัวของกราฟและสมรรถนะทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตามระดับความเร็วขับเคลื่อนนี้ จึงเป็นข้อพิสูจน์ที่ยืนยันว่าอัตราการไหลและความร้อนเหลือทิ้งของน้ำหล่อเย็นผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อน มีค่าผันตรงตามความเร็วรอบและภาระงานของเครื่องยนต์จักรยานยนต์อย่างแท้จริง

2. ผลกระทบของการเปลี่ยนภาระเครื่องยนต์ 200 และ 300 นิวตัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลกระทบของภาระเครื่องยนต์ ณ ระดับความเร็วเดียวกัน พบว่าการเพิ่มภาระเครื่องยนต์จาก 200 นิวตัน ขึ้นเป็น 300 นิวตัน ส่งผลทำให้พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้แก่ กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้น (เช่น การเปรียบเทียบระหว่าง trial ที่ 1 และ 2 หรือ trial ที่ 5 และ 6) ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ว่า การเพิ่มภาระเชิงกลให้แก่เครื่องยนต์ทำให้เครื่องยนต์ต้องจ่ายกำลังงานมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลออกจากเสื้อสูบมีระดับความร้อนสะสมที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนป้อนเข้า (Q_c) สู่โมดูล TEG เพิ่มขึ้น ระบบจึงสามารถผลิตกำลังไฟฟ้า ประสิทธิภาพ (η) และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้สูงที่สุดในแต่ละช่วงความเร็ว โดยสภาวะการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภาระ 300 นิวตัน (trial 6) ให้ระดับกราฟสมรรถนะที่สูงที่สุดตลอดการทดลอง

3. การเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบบนถนนจริง (road test) และในห้องปฏิบัติการ (lab test) ที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

จาก (Table 2) เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ความเร็วเดียวกันคือ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่า ผลการทดสอบบนถนนจริง (trial 7 road test) มีประสิทธิภาพร้อยละ 0.605 และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ 0.66 วัตต์ ต่ำกว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ภาระ 200 นิวตัน (trial 5: 0.635%, 0.75 วัตต์ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวถือเป็นข้อจำกัดจากการทดลองภาคสนามจริง (real-world environment) ที่ควบคุมตัวแปรแวดล้อมได้ยากกว่าในห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะความแปรปรวนของกระแสลมปะทะตามธรรมชาติและสภาพผิวถนน ซึ่งส่งผลให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนและการรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิฝั่งร้อนทำได้ยากกว่า ทำให้ผลต่างอุณหภูมิ (ΔT) บนถนนจริงมีค่าน้อยกว่าสภาวะควบคุมเล็กน้อย จึงส่งผลให้สมรรถนะการผลิตไฟฟ้าลดลงเล็กน้อยเช่นกัน

4. การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์และความคุ้มค่า

ในการประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้ง คณะผู้วิจัยได้ประมาณการต้นทุนการจัดสร้างของชุดทดสอบต้นแบบไว้ที่ 850 บาท ซึ่งครอบคลุมค่าใช้จ่ายของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกและอุปกรณ์ประกอบหลักเชิงกลโดยอ้างอิงราคาวัสดุในท้องตลาด โดยไม่ได้รวมค่าแรงและต้นทุนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมจากผลการทดสอบที่สภาวะความเร็วรอบที่ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นความเร็วตามที่กฎหมายกำหนดและทำการควบคุมภาระทดสอบคงที่ 300 นิวตัน ชุดต้นแบบซึ่งประกอบด้วยโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 5 แผ่น สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเฉลี่ยได้ประมาณ 0.71 วัตต์ และเมื่อกำหนดสมมติฐานการใช้งานรถจักรยานยนต์อย่างต่อเนื่องเฉลี่ยวันละ 8 ชั่วโมง จะสามารถกู้คืนและผลิตพลังงานไฟฟ้าสะสมได้ประมาณ 2.07 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี ทั้งนี้ พลังงานไฟฟ้าสะสมที่ผลิตได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการประมาณมูลค่าการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงทางอ้อม โดยพิจารณาจากสัดส่วนภาระการผลิตกระแสไฟฟ้าของเครื่องยนต์ที่ลดลง และอ้างอิงราคาน้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 ที่ราคา 43.95 บาทต่อลิตร (ข้อมูล ณ วันที่ 8 เมษายน 2569) ซึ่งจากการคำนวณภายใต้แบบจำลองเชิงอุดมคติพบว่า ระบบสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงได้ประมาณ 66.76 บาทต่อปี ส่งผลให้มีระยะเวลาคืนทุนทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมขั้นต้นอยู่ที่ประมาณ 12.73 ปี นอกจากนี้ เพื่อศึกษาขีดความสามารถและแนวโน้มของระบบในการขยายขนาด (scaling analysis) คณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์สถานการณ์จำลอง (scenario analysis) สำหรับกรณีเชิงสมมติในการเพิ่มจำนวนโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเป็น 10 แผ่น ซึ่งคาดการณ์ต้นทุนรวมขึ้นส่วนอุปกรณ์เพิ่มขึ้นเป็น 1,250 บาท เนื่องจากแนวคิดการบริหารจัดการต้นทุนวัสดุประกอบร่วมขยายขนาดให้เพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำกว่าสัดส่วนเชิงเส้น การวิเคราะห์นี้อาศัยสมมติฐานที่ว่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่ผลิตได้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (linear relationship) กับจำนวนโมดูลที่ติดตั้ง โดยไม่ได้มีการทดสอบเชิงทดลองจริงในกรณีขยายขนาดดังกล่าว จากการประมาณการพบว่าระบบเชิงสมมติจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 1.42 วัตต์ หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้ากู้คืนสะสม 4.15 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี และยกกระดับมูลค่าการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงขึ้นเป็นประมาณ 133.52 บาทต่อปี ส่งผลให้ระยะเวลาคืนทุนทางเศรษฐศาสตร์ลดลงเหลือเพียงประมาณ 9.36 ปี อย่างไรก็ตาม แม้ว่าระบบผลิตไฟฟ้าประยุกต์นี้จะมีระยะเวลาคืนทุนที่ค่อนข้างยาวเมื่อพิจารณาเฉพาะมูลค่าผลประโยชน์จากการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงโดยตรง แต่ผลการวิจัยชี้ให้เห็นถึงศักยภาพที่เด่นชัดในเชิงวิศวกรรมยานยนต์ในฐานะแหล่งพลังงานเสริม (auxiliary power source) สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่ำ เช่น ระบบเซนเซอร์อัจฉริยะและอุปกรณ์สื่อสารประยุกต์ ซึ่งช่วยสนับสนุนการทำงานของภาระทางไฟฟ้า (load) ได้อย่างต่อเนื่องในระหว่างการขับขี่ การประยุกต์ใช้พลังงานจากความร้อนเหลือทิ้งในลักษณะดังกล่าวนอกจากจะช่วยแบ่งเบาภาระของแบตเตอรี่และระบบกำเนิดไฟฟ้าหลัก (alternator) ของยานยนต์แล้ว ยังส่งผลกระทบต่อการรักษาเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าและช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าในยานยนต์ในระยะยาว ยิ่งไปกว่านั้น แนวคิดดังกล่าวยังเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานเชิงความร้อนโดยรวม ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการประหยัดพลังงานอย่างยั่งยืนในอนาคตเพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าและปรับปรุงระยะเวลาคืนทุนให้เหมาะสมยิ่งขึ้นในอนาคต

อภิปรายผล

จากการศึกษาประสิทธิภาพและสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งของน้ำหล่อเย็นในรถจักรยานยนต์ Honda Rebel 300 พบว่า สภาวะการขับขี่อันประกอบด้วยความเร็วและภาระกระทำของเครื่องยนต์ (ภาระ หรือ load) มีอิทธิพลสอดคล้องกันโดยตรงต่อค่าความต่างอุณหภูมิ (ΔT) และสมรรถนะการผลิตกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (P_{out}) ของชุดต้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก (TEG) ทั้งนี้ ผลการทดลองใน (Table 2) และ (Figure 3) แสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่า เมื่อปรับเพิ่มความเร็วในการขับขี่จาก 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ไปจนถึง 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ควบคู่กับการเพิ่มภาระของเครื่องยนต์จาก

200 เป็น 300 นิวตัน ค่า ΔT และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจะขยับตัวสูงขึ้นตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญ ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์และกลไกเชิงลึกของปรากฏการณ์ซีเบค กล่าวคือ เมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบและภาระกระทำที่สูงขึ้น อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในกระบอกสูบจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความร้อนสะสมที่ถูกส่งผ่านไปยังระบบน้ำหล่อเย็นซึ่งทำหน้าที่เป็นฝั่งร้อนของโมดูล TEG มีปริมาณสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับข้อสันนิษฐานของ Prudhvi et al., (2013) ที่ระบุว่าระบบระบายความร้อนของยานยนต์เป็นแหล่งพลังงานความร้อนเหลือทิ้งศักยภาพสูงที่มีความผันแปรตามสภาวะโหลดใช้งาน ในขณะเดียวกัน ความเร็วรถที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเร่งอัตราการไหลของกระแสลมปะทะภายนอก เกิดเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection) ผ่านแผงระบายความร้อนฝั่งเย็น (cold side) ทำให้การดึงความร้อนออกจากกระบอกสูบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ปัจจุบันทั้งสองด้านนี้ทำหน้าที่ขยายช่องว่างอุณหภูมิระหว่างสองฝั่งของแผ่น TEG (temperature gradient) ให้กว้างขึ้น จนสามารถทำค่า ΔT ได้สูงสุดถึง 47.12°C ที่สภาวะความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภาระ 300 นิวตัน การสร้างผลต่างอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้ตามทฤษฎีของซีเบค จะช่วยกระตุ้นให้พาหะนำไฟฟ้า (charge carriers) ภายในวัสดุกึ่งตัวนำเกิดการแพร่กระจายและเคลื่อนที่จากฝั่งร้อนไปสะสมยังฝั่งเย็นในปริมาณที่มากขึ้น ก่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า และความต่างศักย์ที่สูงขึ้นตามสัดส่วนเชิงเส้นตรง ส่งผลให้ชุดต้นแบบที่ต่ออนุกรมกัน 5 แผ่น สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้สูงสุดที่ 0.82 วัตต์ โดยพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลงานวิจัยของ Ning et al., (2014) และ Kaewkalaya et al., (2023)

อย่างไรก็ตาม เมื่อนำระบบไปทดสอบบนถนนจริง (actual road test) ที่ความเร็วขับ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง กลับพบว่าระบบให้ค่า ΔT เพียง 41.50°C และผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพียง 0.66 วัตต์ (W) ซึ่งมีสมรรถนะต่ำกว่าการทดสอบในสภาวะเดียวกันภายใต้สภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ของห้องปฏิบัติการ (trial 5) ประเด็นนี้สามารถอภิปรายได้ว่า ในการขับที่จริงบนท้องถนนมีตัวแปรภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ความผันแปรของความเร็วและทิศทางลมธรรมชาติ ตลอดจนความไม่เสถียรของรอบเครื่องยนต์เนื่องจากสภาพการจราจร ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อความสม่ำเสมอในการสะสมและถ่ายเทความร้อน ทำให้กลไกการขับเคลื่อนพาหะนำไฟฟ้าตามปรากฏการณ์ซีเบคทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพเนื่องจากค่า ΔT ลดลง นอกจากนี้ ปัญหาสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานโดยรวมของระบบค่อนข้างต่ำ (อยู่ในช่วงร้อยละ 0.526-0.672) เกิดจากข้อจำกัดพื้นฐานทางโครงสร้างเชิงวิศวกรรม 2 ประการ ประการแรกคือ ระดับอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเครื่องยนต์จัดเป็นพลังงานความร้อนทิ้งระดับต่ำ (low-grade waste heat) ทำให้ค่า ΔT ที่เกิดขึ้นจริง (สูงสุด 47.12°C) ยังห่างจากช่วงอุณหภูมิอุดมคติของโมดูล TEG รุ่น SP1848 ซึ่งปกติจำเป็นต้องอาศัยค่า ΔT สูงกว่า 150°C เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ร้อยละ 1-2 ประการที่สองคือ ปัญหาทางกายภาพเกี่ยวกับความไม่สม่ำเสมอในการกระจายตัวของความร้อนบนแผ่นอลูมิเนียมแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับข้อสังเกตเชิงลึกของ Admasu et al., (2013) ที่ระบุว่าหากอุณหภูมิบนแผ่นกระจายความร้อน (heat spreader) ขาดความสม่ำเสมอ จะส่งผลทำให้กำลังไฟฟารวมของระบบลดลง ประกอบกับหากโครงสร้างการระบายความร้อนฝั่งเย็นดึงความร้อนออกได้ไม่ทัน จะเกิดการสะสมความร้อนไหลย้อนกลับข้ามโมดูล (thermal feedback) ซึ่งตรงกับแนวคิดของ Bamrungkan & Lertsatitthanakorn (2018) รวมถึง Mousa & Hegazi (2018) ที่เน้นย้ำว่า การรักษาเสถียรภาพและเพิ่มสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้า TEG จำเป็นต้องพึ่งพาการระบายความร้อนด้านเย็นที่มีประสิทธิภาพสูงควบคู่กันไปเสมอ จากข้อจำกัดและพฤติกรรมทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่พบชี้ให้เห็นว่า ในการวิจัยพัฒนาขั้นต่อไปควรพิจารณาปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมต่อประสานความร้อน (TIM) เพื่อลดความต้านทานความร้อนตามคำแนะนำของ Plerdpring & Boonpichayapa (2016) หรือพิจารณาย้ายตำแหน่งติดตั้งชุดต้นแบบไปยังบริเวณแหล่งความร้อนที่มีระดับอุณหภูมิสูงกว่าน้ำหล่อเย็น เช่น บริเวณผิวท่อไอเสีย ตามแนวทางของ Ambulkar et al., (2024) เพื่อยกระดับความต่างอุณหภูมิให้สูงขึ้น จนสามารถสร้างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่คุ้มค่าในเชิง

พาณิชย์และประยุกต์ใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การพัฒนาชุดระบายความร้อนฝั่งเย็น (cold side optimization) เช่น การเพิ่มพื้นที่ครีระบายความร้อน หรือการประยุกต์ใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแยกส่วน เพื่อให้อุณหภูมิฝั่งเย็นต่ำลง ซึ่งจะช่วยเพิ่มผลต่างอุณหภูมิ และเพิ่มกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้โดยไม่ต้องเพิ่มจำนวนโมดูล และการลดต้นทุนรวมขึ้นผ่านกระบวนการขยายขนาดเชิงพาณิชย์ (economy of scale) ซึ่งหากผลิตในปริมาณมาก ต้นทุนคงที่ของอุปกรณ์จับยึดและท่อทางเดินจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ระยะเวลาคืนทุนสั้นลงและคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมมากยิ่งขึ้น

สรุป

การวิจัยนี้ทำการพัฒนาชุดต้นแบบผลิตไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งของน้ำหล่อเย็นในรถจักรยานยนต์ Honda Rebel 300 โดยใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 5 แผ่น ผลการทดสอบพบว่า ความเร็วและภาระเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการผลิตไฟฟ้า โดยเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และภาระเพิ่มจาก 200 เป็น 300 นิวตัน จะทำให้อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นสูงขึ้นพร้อมกับมีลมปะทะระบายความร้อนได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิ (ΔT) เพิ่มขึ้นจนสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 0.82 วัตต์ และมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุดร้อยละ 0.67 แม้ค่าประสิทธิภาพจะอยู่ในช่วงเริ่มต้นตามข้อจำกัดของวัสดุในสภาวะอุณหภูมิต่ำ ในด้านการนำไปใช้งานพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากชุดต้นแบบมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองหรือจ่ายไฟโดยตรงให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กภายในยานยนต์ เช่น ระบบตรวจวัดแรงดันลมยางอัตโนมัติ (TPMS) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ หรือชุดไฟสัญญาณ LED เพื่อความปลอดภัย ซึ่งการนำพลังงานความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่นี้ ไม่เพียงแต่เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องยนต์ แต่ยังช่วยลดภาระการทำงานของแบตเตอรี่หลักและระบบประจุไฟ ช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าในรถจักรยานยนต์ได้ในระยะยาว แนวทางการพัฒนาในอนาคตควรพิจารณาการติดตั้งชุดโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกในบริเวณที่มีระดับอุณหภูมิสูงกว่าน้ำหล่อเย็น เช่น บริเวณท่อไอเสีย เพื่อสร้างความต่างอุณหภูมิ ให้สูงขึ้นตามศักยภาพสูงสุดของวัสดุ ไปกับการออกแบบระบบระบายความร้อนฝั่งเย็นที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และการพัฒนาวัสดุประสานความร้อน (TIM) เพื่อลดความต้านทานความร้อนสะสม ซึ่งจะช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนพลังงานและความเสถียรของระบบผลิตไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- Admasu, B., Luo, X., & Yao, J. (2013). Effects of temperature non-uniformity over the heat spreader on the outputs of thermoelectric power generation system. *Energy Conversion and Management*, 76, 533-540. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.014>
- Ambulkar, S. S., Langdapure, V. S., Shaikh, F. N., Khillare, S. S., & Sahaare, R. M. (2024). Electricity generation from heat exhaust of motorcycle. *International Journal of Novel Research and Development*, 9(3), c305-c312. <https://www.ijnrd.org/viewpaperforall.php?paper=IJNRD2403241>
- Bamrungran, P., & Lertsatitthanakorn, C. (2018). Heat rejection alternatives for thermoelectric power generator. *Kasetsart Engineering Journal*, 29(97), 87-94. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/kuengj/article/view/78945/63161> (in Thai)
- Barnard, R. H. (2001). *Road vehicle aerodynamic design*. Mechaero Publishing.
- Cossalter, V. (2006). *Motorcycle dynamics* (2nd eds.). Lulu.com.

- Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. Society of Automotive Engineers.
<https://doi.org/10.4271/R-114>
- Kaewkalaya, P., Damrongkijkosol, C., & Chantawong, P. (2023). A study of electricity generation from heat on the roof of a house using thermoelectric module. *Advanced Science Journal*, 23(2), 18-19.
<https://li02.tci-thaijo.org/index.php/adscij/article/download/481/383> (in Thai)
- Mousa, A. S., & Hegazi, A. A. (2018). Performance analysis of a passively cooled thermoelectric generator. *Energy Conversion and Management*, 173, 399-411. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.085>
- Ning, Z., Takeru, M., Ryutaro, S., & Takashi, T. (2014). Development of a small solar power generation system based on thermoelectric generator. *Energy Procedia*, 52, 651-658.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.121>
- Plerdpring, T., & Boonpichayapa, T. (2016). The study of thermoelectric properties of In₆Sb₅Te. *RMUTSB Academic Journal*, 5(1), 57-65. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsb-sci/article/view/99574> (in Thai)
- Prudhvi, G., Vinay, G., & Babu, G. (2013). Automobile and automotive cooling system. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2(4), 594-601.
<https://www.ijeat.org/wpcontent/uploads/papers/v2i4-/D1447042413.pdf>
- Rowe, D. M. (2018). *Thermoelectrics handbook: Macro to nano*. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781420038903>
- Sarayoot, T., & Worawit, I. (2018). Based power generator from solar drying machine. *Proceeding of the 7th International Symposium on Fusion of Science and Technology* (pp. 49-53). Bangkok, Thailand.
<http://rdi.rmutsb.ac.th/digipro/isft2018/isft2018.pdf> (in Thai)
- Sisamoe, C., & Chaktranond, C. (2021). Energy recovery assessment in dairy production process. *RMUTSB Academic Journal*, 9(2), 199-211. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsb-sci/article/view/250932/173073> (in Thai)
- Surinarin, A., Damrongkijkosol, C., & Chantawong, P. (2024). The study of using hot water from the solar-exposed water pipeline for the electricity generation from the thermoelectric sets with and without the underground heatsink unit. *Frontiers in Engineering Innovation Research*, 22(1), 69-80.
<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jermutt/article/view/255229/172385> (in Thai)
- Thongkulphat, S., & Srithanauthaikorn, P. (2017). Electrical energy generation by thermoelectric from an air conditioner. *RMUTSB Academic Journal*, 5(1), 60-67. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsb-sci/article/view/99864/77571> (in Thai)