

อิทธิพลของความลาดชันบนทางหลวงต่ออุณหภูมิของมอเตอร์แบบดุมล้อ

INFLUENCE OF HIGHWAY DRIVING TERRAIN TO HUB-MOTOR TEMPERATURE

ธเนศ วิลาสมงคลชัย^{*1} ณรงค์ฤทธิ์ ยิ้มเจริญพรสกุล²Thanet Vilasmongkolchai¹, Narongrit Yimcharoenpornsakul²^{*1} คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม² สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

*thanetv@siamtechno.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการทดสอบปัจจัยด้านความลาดชันของพื้นถนนต่ออุณหภูมิของมอเตอร์แบบดุมล้อ โดยทำการบันทึกผลระหว่างการแข่งขันในรายการ Bridge Stone World Solar Challenge 2019 โดยมีระยะในการแข่งขันทั้งสิ้น 3,022 กิโลเมตร ซึ่งผ่านภูมิประเทศและสภาพอากาศที่แตกต่างกัน ให้ผลการกระจายตัวของความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิต่อความชันที่เปลี่ยนแปลง พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลจะอยู่ในช่วงผลต่างของอุณหภูมิที่ 28°C ทั้งนี้ไม่สามารถเห็นผลเชิงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อความลาดชันมากนัก เนื่องจากอุณหภูมิอาจมีการสะสมจากการเปลี่ยนแปลงของความลาดชันในสภาพภูมิประเทศแบบเนินเขา ทั้งนี้เมื่อพิจารณาผลรวมกับความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดช่วงระยะทาง พบว่าหากอุณหภูมิของมอเตอร์มีค่าสูงขึ้นมากกว่างานการทำงานในสภาวะปกติก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าลดต่ำลง

คำสำคัญ: มอเตอร์แบบดุมล้อ, อุณหภูมิ, สภาพทาง

ABSTRACT

This research aims to test the effect of road terrain on the temperature of BLDC hub motor. The data has been collected during Bridgestone World Solar Challenge 2019, over 3,022 km route through difference terrain and difference ambient temperature. The results shown the relationship between the different of motor temperature and ambient temperature on the road terrain mostly distributed on 28 °C but it is not clearly present as the trend. That because the cumulative heat in the motor's cover during drive through the change of road slope as hill shaped terrain.

วันที่รับบทความ 6 มีนาคม 2564

วันที่แก้ไขบทความ 19 มีนาคม 2564

วันที่ตอบรับบทความ 29 มีนาคม 2564

On the consideration of energy consuming along the route, found that the motor's temperature can be degrade the driving efficiency whenever the motor's temp exceeds the working temperature range.

Keywords: BLDC Hub-motor, Temperature, Road Terrain

1. บทนำ

ในสถานการณ์ปัจจุบันไม่เพียงแต่ปัญหาด้านพลังงานที่สร้างความตื่นตัวให้กับประชากรโลก แต่สถานการณ์ด้านสิ่งแวดล้อมก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ทุกคนให้ความสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้พลังงานในภาคการขนส่งที่ทุกคนไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ และยิ่งในพื้นที่เมืองที่มีการจราจรที่ติดขัดย่อมเกิดมลภาวะทางอากาศจากแก๊สที่เป็นผลจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนเป็นทวีคูณ ในการแก้ปัญหาดังกล่าวทำให้ช่วง 10 ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีจุดเด่นด้านการใช้พลังงานสะอาด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์หลักในการขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเทคโนโลยีการขับเคลื่อนนี้สามารถจำแนกกลุ่มวิจัยได้หลากหลาย ทั้งในส่วนของมอเตอร์ ส่วนควบคุม และส่วนของการส่งถ่ายกำลัง ทั้งนี้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบดุมล้อ ถือเป็นตัวเลือกสำคัญตัวเลือกหนึ่งของยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากไม่มีการส่งถ่ายกำลังจากชุดเกียร์ทำให้เกิดการสูญเสียทางกลที่เกิดขึ้น แต่ต้องแลกมาด้วยความต้องการแรงบิดจากมอเตอร์ที่ต้องสร้างแรงขับที่ล้อโดยตรง ซึ่งมอเตอร์แบบดุมล้อนี้สามารถพบเห็นได้โดยทั่วไปในรถจักรยานไฟฟ้า จักรยานยนต์ไฟฟ้า ตลอดจนรถยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก แต่อาจกล่าวได้ว่ามอเตอร์แบบดุมล้อนี้จะระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าสมัยใหม่ในอนาคตอันใกล้ ซึ่งสามารถพบเห็นเทคโนโลยีนี้ใช้งานจริงแล้วในรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar EV) ตลอดจนชุดรองรับรถยนต์ไฟฟ้า (EV platform)

ปัญหาสำคัญประการหนึ่งของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าคืออุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าจะลดต่ำลงโดยอัตโนมัติ และเนื่องจากการใช้งานทำให้ปัญหาด้านอุณหภูมิไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ การขับเคลื่อนบนทางชันจะทำให้มีความต้องการกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นและส่งผลให้อุณหภูมิของมอเตอร์สูงขึ้นตามไปด้วย และขณะเดียวกันเมื่อรถมีอัตราหน่วงจะเกิดกระแสไฟฟ้าย้อนกลับ (regenerative) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้มอเตอร์และกล่องควบคุมมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์แบบดุมล้อที่รับภาระโดยตรงจากล้อ ดังนั้นแล้วการทดลองการขับขึ้นถนนจริงจึงเป็นข้อมูลสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีการขับเคลื่อน งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของสภาพการขับขึ้นทางหลวงต่ออุณหภูมิของมอเตอร์แบบดุมล้อ โดยทำการทดสอบการวิ่งจริงบนถนน Stuart Highway ซึ่งเป็นทางหลวงเส้นหลักของประเทศออสเตรเลีย ทำให้สามารถบันทึกผลต่อภูมิประเทศที่แตกต่างกัน รวมถึงอุณหภูมิของบรรยากาศที่แตกต่างกันด้วย

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาของระบบสะสมพลังงานอย่างแบตเตอรี่ที่ประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน ไปสู่การใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นระบบขับเคลื่อน เนื่องด้วยข้อได้เปรียบของมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหนือกว่าทั้งในเชิงสมรรถนะ ประสิทธิภาพ การบำรุงรักษา ตลอดจนด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งเมื่อ

พิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์สันดาปภายในและมอเตอร์ไฟฟ้าแล้ว ปัญหาหลักที่ยังคงต้องคำนึงถึงอยู่ตลอดคือความร้อนจากการใช้งาน โดยการแก้ปัญหาโดยทั่วไปสามารถทำได้โดยการหล่อเย็นหรือการใช้การแลกเปลี่ยนความร้อน

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์ไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง เนื่องจากอุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กและทำให้แรงบิดลดลงไปด้วย [1, 2] ทั้งนี้ได้มีการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่านกับประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้า โดยตั้งข้อสังเกตถึงบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ไฟฟ้าส่วนใหญ่มีการผลิตในประเทศที่ไม่ใช่เขตร้อน แต่เมื่อมีการใช้งานในเขตร้อนประสิทธิภาพจะมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งผลการทดสอบพบว่าความต้านทานของขดลวดที่เพิ่มขึ้นจากผลของอุณหภูมิทำให้แรงบิดลดลงแต่ความเร็วรอบสูงขึ้น [3]

นอกจากนี้มอเตอร์ไฟฟ้าไม่เพียงแต่อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นจากความต้องการกระแสไฟฟ้าในการทำงานเท่านั้น การที่รถยนต์ไฟฟ้ามีการหน่วงความเร็วลง มอเตอร์จะกระทำหน้าที่เสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟกลับให้แบตเตอรี่ (regenerative braking) กระบวนการดังกล่าวนี้สามารถลดการใช้พลังงานได้ 8-25% [4] ดังนั้นแล้วการเกิดกระแสไฟย้อนกลับย่อมทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ามีอุณหภูมิสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นแล้วสภาพภูมิประเทศและความลาดชันของผิวนถนนจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นต่อมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงานของรถยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในมอเตอร์แบบดุมล้อที่ทำการขับเคลื่อนโดยตรงที่ล้อโดยไม่ผ่านการทดด้วยกล่องเกียร์ ซึ่งแม้ว่าจะมีการโต้เถียงกันเรื่องการทดเกียร์เพื่อเพิ่มแรงบิดด้วยกล่องเกียร์ หรือลดการสูญเสียจากกล่องเกียร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้า [5-7] แต่ด้วยเทคโนโลยีที่ก้าวหน้ามากขึ้นของมอเตอร์ไฟฟ้าผนวกกับการติดตั้งเพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นต่อพื้นที่ใช้สอย [7] จึงอาจกล่าวได้ว่ามอเตอร์แบบดุมล้อจะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในรถยนต์ไฟฟ้าในอนาคตอันใกล้ ทั้งนี้สิ่งหนึ่งที่พึงระวังสำหรับมอเตอร์แบบดุมล้อคือความผันผวนของแรงบิดซึ่งเป็นผลมาจากการไม่มีกล่องเกียร์เพื่อทดเกียร์ ดังนั้นความต้องการกระแสไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อโหลดหรือกล่าวคือ สภาพผิวการจราจรและสภาพภูมิประเทศจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ขึ้นตรงกับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบดุมล้อ

สำหรับปัจจัยภายนอก อาทิ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ก็มีการส่งผลกระทบต่อศักยภาพในการระบายความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้า นอกจากนี้อุณหภูมิของผิวนถนนที่มีการแผ่รังสีมายังมอเตอร์แบบดุมล้อนั้นเป็นปัจจัยเสริมให้อุณหภูมิในการทำงานของมอเตอร์แบบดุมล้อสูงขึ้นไปอีก จากงานวิจัยพบว่าในช่วงอุณหภูมิสูงสุด ผิวนถนนชนิดยางมะตอยจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศถึง 20.96°C [8]

3. วิธีการวิจัย

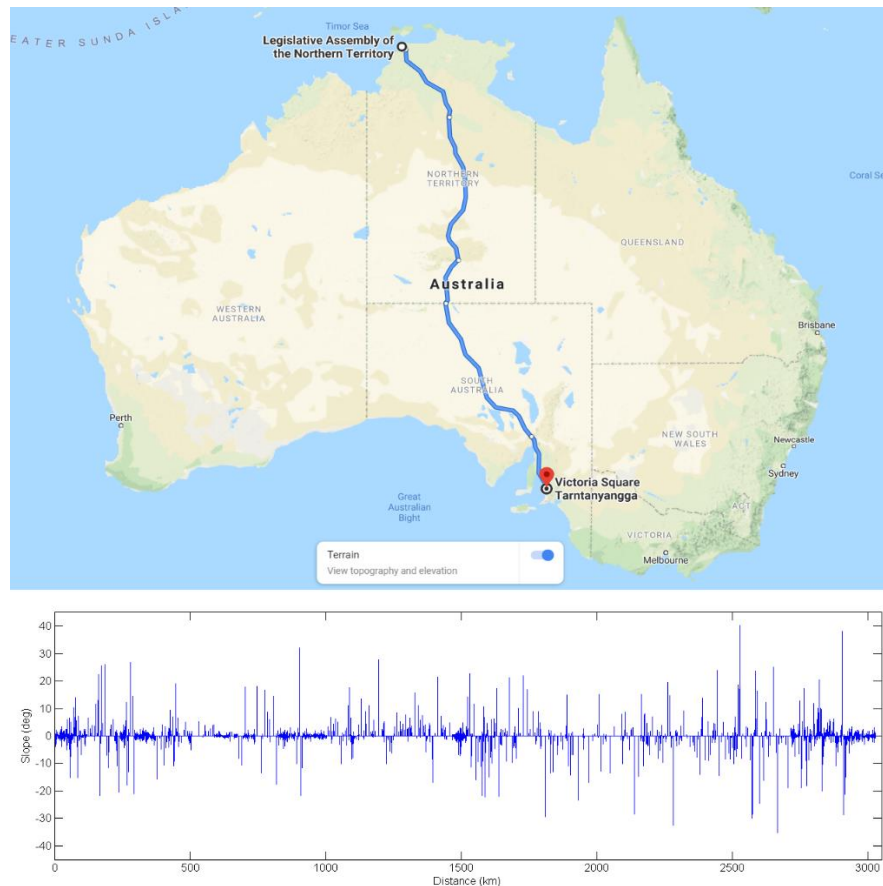
งานวิจัยนี้ได้ทำการบันทึกผลระหว่างการแข่งขันในรายการ Bridge Stone World Solar Challenge 2019 ณ ประเทศออสเตรเลีย โดยมีระยะในการแข่งขันทั้งสิ้น 3,022 กิโลเมตร ตลอดเส้นทางจากเหนือสุดของทวีปไปยังใต้สุดของทวีป ซึ่งทำให้ผ่านภูมิประเทศและสภาพอากาศที่แตกต่างกันอย่างมากมาย ดังนั้นแล้วการแปลผลที่ได้จากการแข่งขันจึงไม่อาจสามารถทำการแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลแบบต่อเนื่องได้ จึงมีความจำเป็นต้องจำแนกข้อมูลออกเป็น ด้านภูมิประเทศ ซึ่งประกอบด้วยเส้นทางชันและเส้นทางลาด และด้านอุณหภูมิของบรรยากาศโดยทำการติดตั้งให้เครื่องมือวัดอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับมอเตอร์ เพื่อรวมผลกระทบจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดจากการแผ่รังสีของผิวนถนนด้วย ซึ่งสามารถแสดงตารางแสดงตัวแปรได้ดังตารางที่ 1 นอกจากนี้เพื่อลดผลกระทบจาก

การสะสมของอุณหภูมิ วัสดุห่อหุ้มมอเตอร์ทำจากอลูมิเนียม และระบายความร้อนด้วยอากาศโดยผ่านอากาศจากช่องด้านข้างของตัวรถ ทั้งนี้ทุกค่าการทดลองจะถูกเก็บจากมอเตอร์แบบคูลล์ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อหลังจำนวน 2 ตัว (ซ้าย-ขวา) ซึ่งทำงานอย่างอิสระต่อกันด้วยวงจรเพื่อง่ายอิเล็กทรอนิกส์ (electronics differential gear) และหาค่าเฉลี่ย และเพื่อให้การวัดค่าอุณหภูมิสอดคล้องกับพฤติกรรมเชิงไฟฟ้าของมอเตอร์ จะทำการวัดค่าอุณหภูมิภายในมอเตอร์หลังจากค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากกล่องควบคุมอยู่ในสภาวะคงตัว (steady-state) ทั้งนี้ความเร็วในการขับจะปรับตั้งให้อยู่ที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนจากสภาพเส้นทางไม่เกินร้อยละ 5

ในส่วนของการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพด้านพลังงาน จะทำการพิจารณาในภาพรวมตลอดเส้นทางการแข่งขันโดยสามารถแบ่งเป็น 3 ช่วง ซึ่งเป็นการแบ่งระยะตามระเบียบของการแข่งขัน ซึ่งอนุญาตให้ประจุไฟฟ้าจากสถานีชาร์จเพิ่มได้

ตารางที่ 1 รายละเอียดตัวแปรและการบันทึกผลการวิจัย

ตัวแปร	ช่วงตัวแปร	ค่าข้อมูล
น้ำหนักของรถยนต์ไฟฟ้ารวมผู้โดยสาร	1	705kg
ความเร็วเฉลี่ย	1	80kph $\pm$ 5%
อุณหภูมิบรรยากาศ	3	5-19°C 20-34°C 35-49°C
ความลาดชันของผิวถนน	n/a	ตรวจวัด
อุณหภูมิกล่องควบคุม	n/a	ตรวจวัด
อุณหภูมิมอเตอร์	n/a	ตรวจวัด

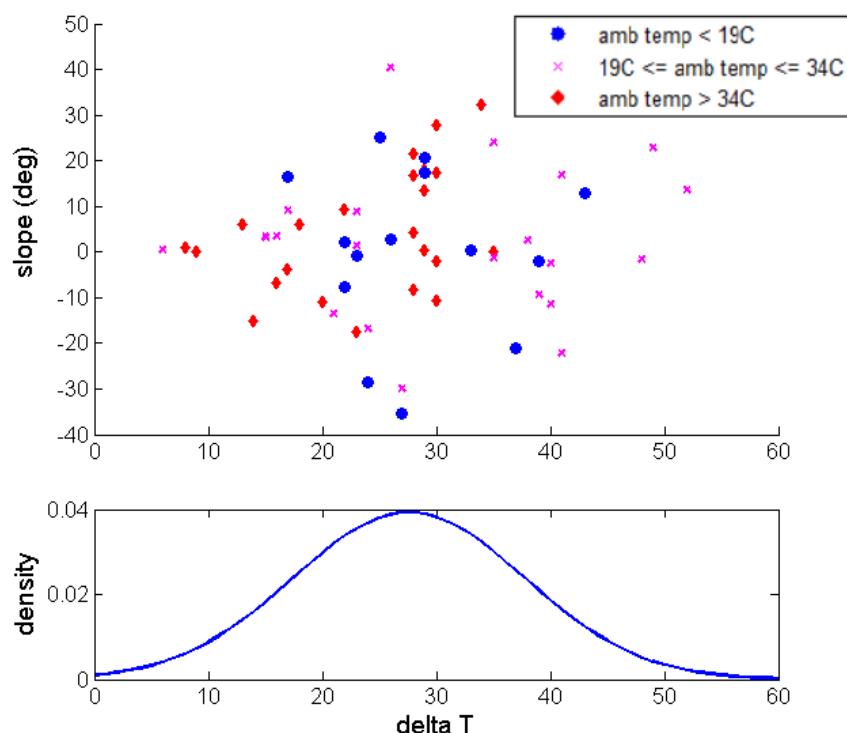


ภาพที่ 1 เส้นทางการแข่งขัน 3,022 กิโลเมตร และความชันตลอดเส้นทาง

4. ผลการวิจัย

การแข่งขันในรายการ Bridge Stone World Solar Challenge 2019 ณ ประเทศออสเตรเลีย บนถนน Stuart Highway โดยมีระยะทางรวม 3,022 กิโลเมตร สามารถแสดงความลาดชันของผิวการจราจรตลอดเส้นทางได้ดังภาพที่ 1 ซึ่งสามารถเห็นสภาพถนนตามภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นพื้นราบ (ความชัน=0) รวมทั้งมีส่วนพื้นที่ลาดชันสูง ตลอดจนภูมิประเทศแบบเนินเขา (ความถี่ของการเปลี่ยนแปลงความลาดชันสูง) ทั้งนี้ผลการวิจัยจะนำค่าที่ตรวจวัดได้โดยสุ่มจากสภาพพื้นถนน โดยมีช่วงเวลาเก็บผลแตกต่างกันตลอดวัน ตั้งแต่ 08:00น. ถึง 17:00 น. ตามเวลาท้องถิ่น ซึ่งสามารถแสดงผลการตรวจวัดในเชิงของผลต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่างอุณหภูมิของมอเตอร์ไฟฟ้าและอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ต่อการเปลี่ยนแปลงความลาดชันของพื้นถนน (องศา) ได้ดังภาพที่ 2 ทั้งนี้สามารถแจกแจงข้อมูลตามอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

- อุณหภูมิต่ำกว่า 19°C (จุดกลมสีน้ำเงิน)
- อุณหภูมิตั้งแต่ 19°C ถึง 34°C (กากบาทสีม่วง)
- อุณหภูมิสูงกว่า 34°C (จุดข้าวหลามตัดสีแดง)



ภาพที่ 2 ผลต่างของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิของมอเตอร์แบบคูลล์ ต่อความลาดชันเฉลี่ยของผิวจราจร

ผลการกระจายตัวของชุดข้อมูลที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิต่อความชันที่เปลี่ยนแปลง สามารถแปรผลได้ตามการกระจายตัวเส้นโค้งมาตรฐาน (ภาพที่ 2 ล่าง) พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลจะอยู่ในช่วงผลต่างของอุณหภูมิที่ 28°C ทั้งนี้ไม่สามารถเห็นผลเชิงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อความลาดชันมากนัก เนื่องจากอุณหภูมิอาจมีการสะสมจากการเปลี่ยนแปลงของความลาดชันในสภาพภูมิประเทศแบบเนินเขา ซึ่งมีการขึ้นทางชันและต้องการกระแสไฟฟ้ามากขึ้นและในแนวทางเดียวกันเมื่อลงทางลาดและกำเนิดกระแสย้อนกลับ ส่งผลให้อุณหภูมิของมอเตอร์สูงขึ้นตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด

นอกจากนี้จากการกระจายตัวของข้อมูลจะอยู่ในช่วงผลต่างของอุณหภูมิที่ 28°C สามารถแปลผลในเชิงของการถ่ายเทความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบคูลล์ และสามารถประเมินประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าได้ โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบเชิงพลังงานของรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [9] (ตารางที่ 2) พบว่าเมื่อพิจารณาในส่วนของพลังงานที่ใช้ไป โดยอ้างอิงจากแบบจำลองที่คำนวณจากเส้นทางและสภาพการขับขี่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน น้ำหนักรถและผู้โดยสาร ตลอดจนปัจจัยทางกายภาพอื่นที่อาจเกิดขึ้น พบว่ามีการใช้พลังงานจริงมากกว่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองยกเว้นระยะทางระหว่าง Coober Pedy ไปยัง Adelaide ซึ่งมีอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำจึงอาจสรุปได้ว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านพลังงานของการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แบบคูลล์ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการกระจายตัวของระหว่างผลต่างของอุณหภูมิต่อความชันที่เปลี่ยนแปลง (ภาพที่ 2) มีการกระจายตัวเป็นวงกว้างหรืออาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านพลังงานอย่างไม่มีนัยสำคัญมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของมอเตอร์อยู่ในสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ยอมรับได้ แต่เมื่อพิจารณาในช่วงเส้นทางจาก Tennant Creek ไป

ยัง Coober Pedy พบว่ามีความคลาดเคลื่อนด้านความต้องการใช้พลังงานค่อนข้างสูงกว่าเส้นทางอื่น ซึ่งเมื่อพิจารณาประกอบกับการกระจายตัวของระหว่างผลต่างของอุณหภูมิต่อความชื้นที่เปลี่ยนแปลง (ภาพที่ 2) พบว่าการกระจายของข้อมูลที่ผลต่างของอุณหภูมิมอเตอร์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิล้างแวดล้อมมากกว่า 45°C อยู่ด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการตอบสนองต่อโหลดด้านความลาดชันของเส้นทาง อยู่สูงกว่าย่านสภาวะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า (อุณหภูมิมอเตอร์ไฟฟ้าสูงสุดที่ตรวจวัดได้ที่ 81°C) จึงส่งผลให้มีการใช้พลังงานจริงมากกว่าแบบจำลอง

ตารางที่ 2 รายละเอียดการใช้พลังงานที่ตรวจวัดได้จากการแข่งขัน

เส้นทางการแข่งขัน	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	พลังงานที่ใช้ตลอดระยะทาง (kWh)		
		Model	Actual	R^2
Darwin to Tennant Creek	43.2	96.25	97.93	0.983
Tennant Creek to Coober Pedy	31.5	94.63	97.71	0.968
Coober Pedy to Adelaide	18.4	65.23	65.08	0.997

5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดเด่นจากการทดสอบวิ่งจริงบนถนนหลวงซึ่งเป็นข้อได้เปรียบต่อเนื่องตลอดทั้งวัน ซึ่งให้ข้อมูลในสภาวะงานจริงต่อการแปลผลด้านสภาพทาง แต่ขณะเดียวกันก็ไม่สามารถทำการเก็บผลโดยควบคุมตัวแปรต่างๆได้โดยสมบูรณ์ อาทิ ไม่สามารถทิ้งระยะเวลายืนตัวของมอเตอร์ไฟฟ้าก่อนทำการทดลองซ้ำ ตลอดจนมีการเก็บผลโดยสุ่มช่วงเวลา ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงอาจเกิดปัจจัยส่งเสริมได้แก่ ความร้อนสะสม และความร้อนจากการแผ่รังสีของผิวถนนด้วย ผลการวิจัยจึงไม่สามารถแสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อความลาดชันมากนัก ทั้งนี้หากสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆได้ดีขึ้นจะสามารถความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของมอเตอร์ต่อความลาดชันได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามความลาดชันของทางจะส่งผลต่ออุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการตอบสนองต่อโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้า ทั้งนี้หากอุณหภูมิของมอเตอร์มีค่าสูงขึ้นมากกว่าย่านการทำงานในสภาวะปกติก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าลดต่ำลง ซึ่งสามารถเห็นพฤติกรรมได้ชัดเจนขึ้นเมื่อพิจารณาผลรวมกับความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดช่วงระยะทาง

ทั้งนี้สามารถนำองค์ความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบระบายความร้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าแบบคูลลิ่งแบบแอคทีฟ ซึ่งอาจใช้ระบบควบคุมร่วมด้วยเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดทั้งด้านพลังงานและประสิทธิภาพ

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณทีมงานรถพลังงานแสงอาทิตย์ STC-3 วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม พร้อมทั้งผู้สนับสนุนการเข้าร่วมแข่งขันทุกท่านทั้งในนามองค์กร และนามบุคคล

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Sebastian. **Temperature effects on torque production and efficiency of PM motors using NdFeB magnets**. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, Vol. 31, No. 2, pp. 353-357.
- [2] Carmen Lungoci and Dan Stoia. **Temperature Effects on Torque Production and Efficiency of Motors with NdFeB**, Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg 2008., Vol. 53, No. 4, pp. 445–454.
- [3] Garniwa et. al. **Analysis of the Effect of the Motor Temperature to Brushless Direct Current Motor Performance on KARLING Electric Vehicle**. 2019 J. Phys.: Conf. Ser. No. 1376.
- [4] Z. F. Bai, S. X. Li, and B. G. Cao, **H^∞ Control Applied to Electric Torque Control for Regenerative Braking of an Electric Vehicle**, 2005, Asian Network for Scientific Information, vol. 5.
- [5] Polychronis Spanoudakis et. al. **Experimental Research of Transmissions on Electric Vehicles' Energy Consumption**. 2019, Energies, Vol. 12, No. 388.
- [6] Polychronis Spanoudakis et. al. **Efficient Gear Ratio Selection of a Single-Speed Drivetrain for Improved Electric Vehicle Energy Consumption**. 2020, Sustainability, Vol. 12, No. 9254.
- [7] Yuechao Sun, Man Li and Cong Liao. **Analysis of Wheel Hub Motor Drive Application in Electric Vehicles**. 2016, Global Congress in Manufacturing and Management (GCMM 2016), MATEC Web of Conferences, Vol. 100.
- [8] Peng Yang et. al. **Study on Temperature Field Distribution of Asphalt Overlay on Existing Cement Pavement**. 2017, Advances in Engineering Research (AER), vol. 143, pp.196-203.
- [9] Thanet Vilasmongkolchai, Rattapol Phosri, Pinitnai Sittithai, and Thichakorn Visansakon, **Efficiency Test of Solar Vehicle Towards Australia's Terrain on Stuart Highway 1 Road**, 2020, The 4th International Symposium Bangkokthonburi University, pp. 483-490.