

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพและต้นทุนการขนส่งของรถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันเครื่อง มาตรฐาน ซี เค โฟร์ และ ซี ไอ โฟร์ ของบริษัทโรงโม่หิน เอ บี ซี จำกัด จังหวัดสระบุรี Comparative Study on Transportation Efficiency and Cost of Trucks Using Ck-4 And Ci-4 Engine Oils in A B C Stone Mill Co., Ltd., Saraburi Province

เอกลักษณ์ สีตาบุตร¹ และชิตพงษ์ อัยสานนท์^{2*}

Eakkaluck Seetabutte¹ and Chitpong Ayasanond^{2*}

Received: March 2, 2026

Revised: March 20, 2026

Accepted: March 23, 2026

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) เปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CK-4 และ API CI-4 (2) เปรียบเทียบต้นทุนการขนส่งรวมระหว่างน้ำมันเครื่องทั้งสองมาตรฐาน และ (3) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Total Base Number (TBN) ของน้ำมันเครื่องกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ใช้รูปแบบการวิจัยเชิงทดลองภาคสนามแบบสลับกลุ่ม กลุ่มตัวอย่างคือรถบรรทุกหนักของบริษัทโรงโม่หินแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี จำนวน 10 คัน แบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 5 คัน เก็บข้อมูลจากเที่ยววิ่งจริงรวม 500 เที่ยว เป็นระยะเวลา 2 เดือน (กลุ่มละ 1 เดือนต่อชนิดน้ำมัน) เครื่องมือวิจัยประกอบด้วยระบบ GPS ติดตามพาหนะ อุปกรณ์วัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ผ่านการสอบเทียบ และการวิเคราะห์คุณสมบัติ น้ำมันเครื่องในห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO/IEC 17025 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ paired samples t-test โดยใช้รถบรรทุกเป็นหน่วยวิเคราะห์ ($n = 10$) คำนวณค่าเฉลี่ยต่อคันก่อนเปรียบเทียบ หลังจากใช้น้ำมันเครื่องครบ 10,000 กิโลเมตร ผลการวิจัยพบว่า (1) รถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันเครื่อง CK-4 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้ น้ำมันเครื่อง CI-4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t(9) = -3.21, p = .011, \text{Cohen's } d = 1.02$) (2) รถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันเครื่อง CK-4 มีต้นทุนการขนส่งรวมต่อเที่ยวต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้ น้ำมันเครื่อง CI-4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t(9) = -3.856, p = .004, \text{Cohen's } d = 1.22$) และ (3) ค่า TBN ของน้ำมันเครื่องภายหลังการใช้งานมีความสัมพันธ์เชิงลบกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ($r = -.74, p = .014$) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงสหสัมพันธ์ ไม่ใช่ความสัมพันธ์เชิงเหตุและผลโดยตรง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า น้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CK-4 มีศักยภาพในการลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและต้นทุนการขนส่งในสภาพการดำเนินงานจริงของอุตสาหกรรมโรงโม่หิน อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยมีขอบเขตจำกัดตามขนาดกลุ่มตัวอย่างและระยะเวลาการทดลอง จึงควรนำไปประยุกต์ใช้ในบริบทอื่นด้วยความระมัดระวัง

คำสำคัญ: น้ำมันเครื่อง API CK-4 น้ำมันเครื่อง API CI-4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ต้นทุนการขนส่ง

Abstract

This study aimed to (1) compare fuel consumption rates of trucks using API CK-4 and CI-4 engine oils, (2) compare total transportation costs between the two engine oil standards, and (3) examine the correlation between Total Base Number (TBN) of engine oil and fuel consumption rate. A crossover field experiment design was employed. The sample consisted of 10 heavy-duty trucks from a stone mill company in Saraburi Province, divided into two groups of five. Data were collected from 500 actual trips over a two-month period (one month per oil type per group). Research instruments included a GPS vehicle-tracking system, calibrated fuel consumption measurement devices, and engine oil property analysis conducted by an ISO/IEC 17025-accredited laboratory. Data were analyzed using paired samples t-test with the individual truck as the unit of analysis ($n = 10$), whereby per-truck averages were computed prior to comparison after 10,000 kilometers of use. Results indicated that (1) trucks using CK-4 engine oil had a significantly lower fuel consumption rate than those using CI-4 engine oil ($t(9) = -3.21, p = .011, \text{Cohen's } d = 1.02$), (2) trucks using CK-4 engine oil had a significantly lower total transportation cost per trip than those using CI-4 engine oil ($t(9) = -3.856, p = .004$,

^{1,2}อาจารย์ คณะบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต สาขาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทานเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

^{1,2}Lecturer, Business Administration Program, Sustainable Logistics and Supply Chain Management, Bangkokthonburi University

*Corresponding author. E-mail: chitpong.aya@bkkthon.ac.th

Cohen's $d = 1.22$), and (3) TBN of engine oil after use was negatively correlated with fuel consumption rate ($r = -.74$, $p = .014$), representing an associational rather than a causal relationship. The findings demonstrate that API CK-4 engine oil has the potential to reduce fuel consumption and transportation costs under real operational conditions in the stone milling industry. However, the findings are limited by sample size and duration of the experiment and should be applied to other contexts with caution.

Keywords: API CK-4 engine oil, API CI-4 engine oil, Fuel consumption rate, Transportation cost

บทนำ (Introduction)

ต้นทุนเชื้อเพลิงถือเป็นองค์ประกอบหลักของต้นทุนการขนส่งในอุตสาหกรรมที่ใช้รถบรรทุกหนักเป็นพาหนะหลัก โดยมีการประมาณการว่าต้นทุนเชื้อเพลิงคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 30-40 ของต้นทุนการดำเนินงานรวม ขึ้นอยู่กับลักษณะเส้นทางและน้ำหนักบรรทุก (Liimatainen et al., 2012; สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2565) ในขณะที่ค่าซ่อมบำรุงเครื่องยนต์คิดเป็นสัดส่วนอีกประมาณร้อยละ 10-15 ของต้นทุนการดำเนินงานรวม ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำมันเครื่องแม้เพียงเล็กน้อยจึงอาจส่งผลกระทบต่อผู้ประกอบการขนส่ง

น้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CI-4 ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับเครื่องยนต์ดีเซลที่มีระบบหัวฉีดแรงดันสูงและระบบลดมลพิษ EGR รุ่นแรก (American Petroleum Institute (API), 2017) ในขณะที่มาตรฐาน API CK-4 เป็นมาตรฐานรุ่นใหม่พัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองต่อข้อกำหนดเครื่องยนต์รุ่นใหม่ที่มีระบบควบคุมมลพิษที่เข้มงวดยิ่งขึ้น โดยมีคุณสมบัติที่เหนือกว่าในด้านความต้านทานการออกซิเดชัน การรักษาความหนืด และการป้องกันการสึกหรอของเครื่องยนต์ภายใต้สภาพการใช้งานที่รุนแรง (ASTM International, 2016)

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาผลกระทบของน้ำมันเครื่องต่อประสิทธิภาพเครื่องยนต์และการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากหลายมุมมอง Usman and Park (2021) พบว่าน้ำมันเครื่องที่มีความหนืดต่ำและมีแพ็คเกจเสริมแต่งที่ทันสมัยสามารถลดแรงเสียดทานภายในเครื่องยนต์และปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงได้อย่างมีนัยสำคัญในการทดสอบเชิงเทคนิค Mufti et al. (2018) รายงานว่าสูตรน้ำมันเครื่องที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์ดีเซลรุ่นใหม่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพเชื้อเพลิงได้ร้อยละ 1-3 ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในขณะที่ Holmberg et al. (2014) พบว่าแรงเสียดทานในเครื่องยนต์และระบบส่งกำลังของรถบรรทุกหนักคิดเป็นสัดส่วนประมาณหนึ่งในสามของการสูญเสียพลังงานทั้งหมด ซึ่งสามารถลดลงได้โดยการใช้้ำมันเครื่องประสิทธิภาพสูง

Tormos et al. (2017) ศึกษาผลของน้ำมันเครื่องความหนืดต่ำต่อการประหยัดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลหนัก พบว่าน้ำมันเครื่องที่มีคุณสมบัติแรงเสียดทานต่ำสามารถลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงได้อย่างมีนัยสำคัญในการทดสอบภายใต้สภาวะควบคุม นอกจากนี้ Agoston et al. (2005) แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่องและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ โดยค่า TBN ที่ลดลงมีความสัมพันธ์กับการสูญเสียคุณสมบัติการหล่อลื่น

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเหล่านั้นส่วนใหญ่มุ่งเน้นการศึกษาเชิงเทคนิคในสภาพห้องปฏิบัติการหรือการทดสอบด้วยเครื่องยนต์เดียว โดยยังขาดการศึกษาที่ประเมินผลกระทบเชิงเศรษฐศาสตร์การขนส่งในสภาพการดำเนินงานจริงในภาคสนาม นอกจากนี้งานวิจัยส่วนใหญ่ดำเนินการในบริบทของประเทศพัฒนาแล้ว ซึ่งอาจมีสภาพภูมิอากาศ มาตรฐานเชื้อเพลิง และลักษณะการปฏิบัติงานที่แตกต่างจากบริบทของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมโรงโม่หินที่รถบรรทุกต้องปฏิบัติงานภายใต้สภาพการบรรทุกหนักต่อเนื่อง ฝุ่นละอองสูง และอุณหภูมิแวดล้อมที่สูงตลอดปี (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2563)

ยิ่งไปกว่านั้น จากการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ พบว่ายังไม่มีการศึกษาที่ใช้รูปแบบการทดลองแบบสลับกลุ่ม ในการเปรียบเทียบมาตรฐานน้ำมันเครื่อง CK-4 และ CI-4 ในบริบทภาคสนามของอุตสาหกรรมไทย รูปแบบการทดลองแบบสลับกลุ่มมีข้อดีในการควบคุมความแปรปรวนระหว่างรถแต่ละคัน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เช่น อายุเครื่องยนต์ พฤติกรรมพนักงานขับรถ และสภาพรถ

กรอบแนวคิดการวิจัย

กรอบแนวคิดของการวิจัยนี้อิงตามห่วงโซ่ความสัมพันธ์ดังนี้ คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของน้ำมันเครื่อง (TBN ความหนืด ความต้านทานออกซิเดชัน) → ลดแรงเสียดทานภายในเครื่องยนต์และปรับปรุงการเผาไหม้ → เพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิง → ลดต้นทุนการขนส่งรวม ความสัมพันธ์ระหว่าง TBN กับประสิทธิภาพเชื้อเพลิงในการศึกษานี้เป็นเชิงสหสัมพันธ์ ไม่ใช่เชิงสาเหตุโดยตรง

จากช่องว่างองค์ความรู้ดังกล่าว การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของน้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CK-4 เปรียบเทียบกับ CI-4 ต่อประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงและต้นทุนการขนส่งของรถบรรทุก ภายใต้สภาพการดำเนินงานจริงในอุตสาหกรรมเหมืองหิน จังหวัดสระบุรี โดยใช้รูปแบบการทดลองภาคสนามแบบสลับกลุ่ม ซึ่งถือเป็นรูปแบบการวิจัยที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมความแปรปรวนระหว่างรถในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบประเภทนี้

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (ลิตร/100 กิโลเมตร) ของรถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CK-4 และ API CI-4 ภายใต้การทดลองภาคสนามแบบสลับกลุ่ม
2. เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนการขนส่งรวมต่อเที่ยว (บาท/เที่ยว) ของรถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CK-4 และ API CI-4
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์เชิงสหสัมพันธ์ระหว่างค่า Total Base Number (TBN) ของน้ำมันเครื่องภายหลังการใช้งานกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถบรรทุก

สมมติฐานการวิจัย

H₁ รถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CK-4 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแตกต่างจากรถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CI-4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

H₂ รถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CK-4 มีต้นทุนการขนส่งรวมต่อเที่ยวแตกต่างจากรถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CI-4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

H₃ ค่า TBN ของน้ำมันเครื่องภายหลังการใช้งานมีความสัมพันธ์กับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถบรรทุก

การทบทวนวรรณกรรม

มาตรฐานน้ำมันเครื่อง API CK-4 และ CI-4

น้ำมันเครื่องดีเซลประสิทธิภาพสูงมีบทบาทสำคัญต่อการลดแรงเสียดทานภายในเครื่องยนต์และการป้องกันการสึกหรอ Hamrock et al. (2004) อธิบายว่าคุณสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันเครื่องส่งผลโดยตรงต่อการสูญเสียพลังงานในรูปแบบของความร้อนและการเสียดทาน ซึ่งสะท้อนออกมาในรูปของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

American Petroleum Institute (API) ได้กำหนดมาตรฐานน้ำมันเครื่องสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล โดยมาตรฐาน API CI-4 ได้รับการพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2002 เพื่อรองรับเครื่องยนต์ดีเซลรุ่นแรกที่มีระบบหมุนเวียนไอเสียกลับ (EGR) (API, 2017) ในขณะที่มาตรฐาน API CK-4 ได้รับการกำหนดขึ้นในปี ค.ศ. 2016 เพื่อรองรับเครื่องยนต์ดีเซลรุ่นใหม่ที่มีข้อกำหนด Euro VI/EPA 2017 โดยมีการปรับปรุงในด้านความต้านทานการออกซิเดชัน การรักษาความหนืด และการป้องกันเขม่าในระบบน้ำมันเครื่อง (ASTM International, 2016)

ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติน้ำมันเครื่องกับประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิง

งานวิจัยของ Tormos et al. (2017) พบว่าการลดลงของค่า TBN มีความสัมพันธ์กับการสูญเสียคุณสมบัติการหล่อลื่นและเพิ่มอัตราการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ Usman and Park (2021) ศึกษาผลของน้ำมันเครื่องสมัยใหม่ต่อประสิทธิภาพเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลหนัก พบว่าน้ำมันเครื่องที่มีแพ็คเกจสารเติมแต่งที่ทันสมัยสามารถลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงได้ร้อยละ 1-3 ในสภาพการทดสอบห้องปฏิบัติการ ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mufti et al., (2018) ที่รายงานการประหยัดเชื้อเพลิงจากการใช้น้ำมันเครื่องที่ออกแบบให้มีความเสียดทานต่ำ

Holmberg et al. (2014) วิเคราะห์การใช้พลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานในรถบรรทุกและรถบัส พบว่าแรงเสียดทานในเครื่องยนต์และระบบส่งกำลังคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 33% ของการสูญเสียพลังงานทั้งหมด ซึ่งสามารถลดลงได้ประมาณ 10-20% โดยการใช้ น้ำมันเครื่องประสิทธิภาพสูงและการออกแบบชิ้นส่วนที่เหมาะสม

บริบทอุตสาหกรรมเหมืองหินในประเทศไทย

จังหวัดสระบุรีเป็นแหล่งผลิตหินอุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศไทย โดยมีเหมืองหินกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งจังหวัด (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2563) รถบรรทุกหนักที่ใช้ในอุตสาหกรรมนี้ต้องปฏิบัติงานภายใต้สภาพที่มีฝุ่นละอองสูง น้ำหนักบรรทุก 25-30 ตันต่อเที่ยว และอุณหภูมิสูงตลอดปี ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมที่ท้าทายต่อประสิทธิภาพของน้ำมันเครื่อง

อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่ายังไม่มีงานวิจัยที่ใช้รูปแบบการทดลองแบบสลับกลุ่มในการศึกษาเปรียบเทียบมาตรฐานน้ำมันเครื่องเชิงประจักษ์ในบริบทของอุตสาหกรรมเหมืองหินในประเทศไทย ช่องว่างดังกล่าวเป็นที่มาของการวิจัยครั้งนี้

วิธีการศึกษา (Methodology)

รูปแบบการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ใช้รูปแบบการวิจัยเชิงทดลองภาคสนามแบบสลับกลุ่ม (Crossover Field Experiment) ซึ่งกลุ่มตัวอย่างทุกคันได้รับการทดสอบกับน้ำมันเครื่องทั้งสองชนิดสลับกัน ทำให้แต่ละคันทำหน้าที่เป็นทั้ง treatment group และ control group ในตัวเอง รูปแบบนี้มีข้อดีในการควบคุมความแปรปรวนระหว่างบุคคล ระหว่างรถ เช่น อายุเครื่องยนต์ พฤติกรรมพนักงานขับรถประจำ และสภาพรถ

กลุ่มตัวอย่างและการสุ่ม

กลุ่มตัวอย่างคือรถบรรทุกหนักขนาด 10 ล้อ จำนวน 10 คัน คำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่างจากสูตร paired t-test โดยกำหนด effect size (d) = 0.8, α = .05, power = .80 (Cohen, 1988) กลุ่มตัวอย่างถูกสุ่มแบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 5 คัน โดยกลุ่ม A ใช้น้ำมัน CK-4 ในเดือนแรก แล้วสลับเป็น CI-4 ในเดือนที่สอง ส่วนกลุ่ม B ใช้น้ำมัน CI-4 ในเดือนแรก แล้วสลับเป็น CK-4 ในเดือนที่สอง มีช่วงล้างระยะ (Washout Period) ระหว่างการทดลองสองช่วง โดยเปลี่ยนถ่ายน้ำมันและทำความสะอาดระบบก่อนเริ่มช่วงการทดลองถัดไป

การควบคุมตัวแปรแทรกซ้อน

เพื่อลดอิทธิพลของตัวแปรแทรกซ้อนที่อาจส่งผลต่อผลการทดลอง ได้มีการกำหนดมาตรการควบคุมดังนี้

1. เส้นทางขนส่ง รถทุกคันใช้เส้นทางขนส่งเดียวกันตลอดการทดลอง
2. น้ำหนักบรรทุก กำหนดน้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน 25-30 ตันต่อเที่ยว และบันทึกน้ำหนักจริงทุกเที่ยวเพื่อใช้เป็น covariate ในการวิเคราะห์
3. พนักงานขับรถ กำหนดให้พนักงานขับรถประจำรถตลอดการทดลองเพื่อลดความแปรปรวนของพฤติกรรมขับขี่

4. การบำรุงรักษา รถทุกคันผ่านการบำรุงรักษาตามกำหนดและอยู่ในสภาพมาตรฐานก่อนเริ่มการทดลอง
5. สภาพอากาศ บันทึกอุณหภูมิและสภาพอากาศทุกวันและใช้เป็นข้อมูลประกอบการตีความผล

เครื่องมือวิจัย

เครื่องมือวิจัยประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่

1. ระบบ GPS/วัดเชื้อเพลิง ระบบ GPS ติดตามพาหนะแบบเรียลไทม์ที่บันทึกระยะทาง ความเร็ว และอุปกรณ์วัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ผ่านการสอบเทียบตามมาตรฐานของผู้ผลิตและบันทึกข้อมูลทุกเที่ยว
2. แบบบันทึกต้นทุน แบบบันทึกข้อมูลต้นทุนการขนส่งรายเที่ยว ได้แก่ ปริมาณเชื้อเพลิง ระยะทาง น้ำหนักบรรทุก และค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงาน
3. การวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ เก็บตัวอย่างน้ำมันเครื่องก่อนและหลังการทดลองแต่ละช่วง เพื่อวิเคราะห์ค่า TBN ความหนืด และตัวชี้วัดการเสื่อมสภาพอื่น ๆ โดยห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025

การวิเคราะห์ข้อมูล

หน่วยวิเคราะห์คือรถบรรทุก (n = 10) ไม่ใช่เที่ยววิ่ง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหา pseudo-replication ซึ่งเกิดจากการที่เที่ยววิ่งในรถคันเดียวกันไม่เป็นอิสระจากกัน ขั้นตอนการวิเคราะห์คือคำนวณค่าเฉลี่ยต่อคันสำหรับแต่ละช่วงการทดลอง (CK-4 และ CI-4) ก่อน แล้วจึงนำค่าเฉลี่ยต่อคันมาเปรียบเทียบโดยใช้ paired samples t-test ซึ่งเหมาะสมกับ crossover design เนื่องจากรถแต่ละคันมีการวัดทั้งสองสภาพ รายงาน effect size (Cohen's d) และ 95% confidence interval ควบคู่กับ p-value เพื่อสะท้อนขนาดและความแม่นยำของผลลัพธ์ สำหรับวัตถุประสงค์ข้อ 3 ใช้การวิเคราะห์ Pearson correlation ระหว่างค่า TBN เฉลี่ยรายคันกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ยรายคัน

ผลการศึกษา (Results)

ข้อมูลพื้นฐานกลุ่มตัวอย่าง

ตารางที่ 1 ข้อมูลพื้นฐานของรถบรรทุกกลุ่มตัวอย่าง (n = 10)

รายการ	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ต่ำสุด	สูงสุด
อายุรถ (ปี)	5.2	1.8	3	8
ระยะทางสะสม (กม.)	312,400	85,200	210,000	480,000
น้ำหนักบรรทุกเฉลี่ย (ตัน)	27.3	1.6	25	30
จำนวนเที่ยวในการทดลอง	50	3.2	44	56

หมายเหตุ การวิเคราะห์ทางสถิติใช้ค่าเฉลี่ยรายคัน (n = 10) ไม่ใช่ระดับเที่ยววิ่ง เพื่อหลีกเลี่ยง pseudo-replication

ผลการทดสอบสมมติฐานข้อที่ 1 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ตารางที่ 2 ผล paired samples t-test เปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (n = 10)

ตัวแปร	CK-4 $\bar{X}$ (S.D.)	CI-4 $\bar{X}$ (S.D.)	t	p	Cohen's d	95% CI
อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (ล./100 กม.)	38.42 (1.84)	40.17 (2.11)	-3.21	.011	1.02	(-2.98, -0.52)

หมายเหตุ p < .05 (two-tailed); df = 9; $\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยรายคัน; S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานรายคัน; CI = Confidence Interval ของความแตกต่างเฉลี่ย

ผลการทดสอบ paired samples t-test พบว่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ยของกลุ่มที่ใช้ น้ำมัน CK-4 ($\bar{X}$ = 38.42, S.D. = 1.84 ลิตร/100 กม.) ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้ น้ำมัน CI-4 ($\bar{X}$ = 40.17, S.D. = 2.11 ลิตร/100 กม.) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t(9) = -3.21$, $p = .011$, Cohen's $d = 1.02$, 95% CI = -2.98 ถึง -0.52) ผลนี้สนับสนุนสมมติฐาน H_1

ผลการทดสอบสมมติฐานข้อที่ 2 ต้นทุนการขนส่งรวมต่อเที่ยว

ตารางที่ 3 ผล paired samples t-test เปรียบเทียบต้นทุนการขนส่งรวมต่อเที่ยว ($n = 10$)

ตัวแปร	CK-4 ($\bar{X}$, S.D.)	CI-4 ($\bar{X}$, S.D.)	t	p	Cohen's d	95% CI
ต้นทุนรวมต่อเที่ยว (บาท/เที่ยว)	1,842 (98)	1,930 (112)	-3.856	.004	1.22	(-136, -40)

หมายเหตุ: $p < .01$ (two-tailed); $df = 9$; $\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยรายคัน; S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานรายคัน; CI = Confidence Interval ของความแตกต่างเฉลี่ย; ต้นทุนรวมประกอบด้วยต้นทุนเชื้อเพลิง + ต้นทุนน้ำมันเครื่อง คำนวณจากข้อมูลรายเที่ยวจริงในช่วงทดลอง

ผลการทดสอบ paired samples t-test พบว่าต้นทุนการขนส่งรวมต่อเที่ยวเฉลี่ยของกลุ่มที่ใช้ น้ำมัน CK-4 ($\bar{X}$ = 1,842, S.D. = 98 บาท/เที่ยว) ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้ น้ำมัน CI-4 ($\bar{X}$ = 1,930, S.D. = 112 บาท/เที่ยว) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t(9) = -3.856$, $p = .004$, Cohen's $d = 1.22$, 95% CI = -136 ถึง -40 บาท/เที่ยว) ผลนี้สนับสนุนสมมติฐาน H_2 Effect size ที่มีค่าสูง ($d = 1.22$) บ่งชี้ว่าความแตกต่างมีนัยสำคัญทางปฏิบัติด้วย

ผลการทดสอบสมมติฐานข้อที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง TBN กับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ตารางที่ 4 ค่า TBN ของน้ำมันเครื่องก่อนและหลังการทดลอง และความสัมพันธ์กับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ตัวแปร	CK-4 ($\bar{X}$, S.D.)	CI-4 ($\bar{X}$, S.D.)	r	หมายเหตุ
TBN ก่อนการทดลอง (mg KOH/g)	9.8 (0.3)	7.2 (0.4)	-	ค่ามาตรฐานน้ำมันใหม่
TBN หลังการทดลอง (mg KOH/g)	6.1 (0.5)	3.4 (0.6)	-	หลังใช้งาน 10,000 กม.
TBN (หลังใช้งาน) vs. อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	-	-	-.74	$p = .014$; $n = 10$ คัน (associational)

หมายเหตุ: $p < .05$; $n = 10$ (ระดับรถบรรทุก); ค่า r รายงานความสัมพันธ์ระหว่าง TBN หลังใช้งานกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ยรายคัน (Pearson correlation); ความสัมพันธ์นี้เป็นเชิงสหสัมพันธ์ (associational) ไม่ใช่เชิงสาเหตุ (causal)

ผลการวิเคราะห์ Pearson correlation พบความสัมพันธ์เชิงลบปานกลางถึงสูงระหว่างค่า TBN หลังการใช้งานกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ยรายคัน ($r = -.74$, $p = .014$) กล่าวคือ น้ำมันเครื่องที่มีค่า TBN คงเหลือสูงกว่าหลังการใช้งานมีความสัมพันธ์กับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่า สนับสนุนสมมติฐาน H_3 อย่างไรก็ตาม ควรตีความผลนี้ว่าเป็นความสัมพันธ์เชิงสหสัมพันธ์เท่านั้น ไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์เชิงสาเหตุได้โดยตรงจากข้อมูลนี้

อภิปรายผล (Discussion)

1. อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (วัตถุประสงค์ข้อที่ 1 / สมมติฐาน H_1)

ผลการวิจัยพบว่ารถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CK-4 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ย 38.42 ลิตร/100 กิโลเมตร ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้ น้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CI-4 ซึ่งมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ย 40.17 ลิตร/100 กิโลเมตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ($t(9) = -3.21$, $p = .011$, Cohen's $d = 1.02$) ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐาน H_1 ที่ตั้งไว้ และค่า Effect size ที่สูง ($d = 1.02$) บ่งชี้ว่าความแตกต่างดังกล่าวมีนัยสำคัญทางปฏิบัติ

ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Macián et al. (2020) ซึ่งได้ศึกษาผลของน้ำมันเครื่องความหนืดต่ำต่อประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงในรถบรรทุกหนักจำนวน 49 คัน เป็นระยะเวลายาวนาน พบว่าน้ำมันเครื่องรุ่นใหม่ที่สอดคล้องกับมาตรฐาน API CK-4 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเครื่องรุ่นเก่า โดยเฉพาะในสภาพการทำงานจริง ซึ่งสอดคล้องกับบริบทของการศึกษาครั้งนี้ที่ดำเนินการในภาคสนาม

นอกจากนี้ งานวิจัยของ Macián et al. (2020) ยังชี้ให้เห็นว่าน้ำมันเครื่อง API CK-4 มีคุณสมบัติการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน และความเสถียรทางแรงเฉือนที่ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดของ ASTM D4485-16 ที่ระบุว่ามาตรฐาน CK-4 มีการทดสอบเพิ่มเติม เช่น Mack T13 สำหรับการวัดการเกิดออกซิเดชันภายใต้อุณหภูมิสูง และ CAT Aeration Test สำหรับการวัดการเกิดฟองอากาศในน้ำมันเครื่อง

งานวิจัยล่าสุดจาก Southwest Research Institute (n.d.) ซึ่งเป็นสถาบันวิจัยชั้นนำด้านการทดสอบน้ำมันเครื่อง ได้รายงานว่าการพัฒนามาตรฐาน API CK-4 นั้นรวมถึงการทดสอบที่เข้มงวดมากขึ้นในด้านการควบคุมการสึกหรอของวาล์ว การสะสมของคราบเขม่า และการป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงในระยะยาว

ในบริบทของประเทศกำลังพัฒนา การศึกษาของ Santos and Souza (2025) ในบราซิลได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของน้ำมันเครื่อง API CI-4 SAE 15W40 (แบบ mineral) และ API CK-4 SAE 5W30 (แบบ synthetic) โดยจำลองสภาวะการปนเปื้อนของเชื้อเพลิงชีวภาพ (biodiesel) พบว่าน้ำมันเครื่องรุ่นใหม่มีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าในการรักษาคุณสมบัติการหล่อลื่นภายใต้สภาวะการใช้งานที่รุนแรง ซึ่งสอดคล้องกับสภาพการทำงานของรถบรรทุกในอุตสาหกรรมเหมืองหินของไทยที่มีการบรรทุกหนักและอุณหภูมิสูงต่อเนื่อง

2. ต้นทุนการขนส่งรวมต่อเที่ยว (วัตถุประสงค์ข้อที่ 2 / สมมติฐาน H₂)

ผลการวิจัยพบว่ารถบรรทุกที่ใช้น้ำมันเครื่อง CK-4 มีต้นทุนการขนส่งรวมต่อเที่ยวเฉลี่ย 1,842 บาท/เที่ยว ต่ำกว่ากลุ่มที่ใช้น้ำมันเครื่อง CI-4 ซึ่งมีต้นทุนเฉลี่ย 1,930 บาท/เที่ยว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ($t(9) = -3.856$, $p = .004$, Cohen's $d = 1.22$) ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐาน H₂ ที่ตั้งไว้ โดยค่า Effect size ที่สูงมาก ($d = 1.22$) แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของต้นทุนมีนัยสำคัญทั้งในเชิงสถิติและเชิงเศรษฐศาสตร์

ความแตกต่างของต้นทุนดังกล่าวมีแหล่งที่มาหลักจากอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ต่ำกว่า ประกอบกับราคาน้ำมันเครื่อง CK-4 ที่แม้จะสูงกว่า CI-4 แต่เมื่อพิจารณาต้นทุนรวมในภาพรวมแล้ว การประหยัดเชื้อเพลิงที่ได้มีมูลค่ามากกว่าส่วนต่างของราคาน้ำมันเครื่อง

งานวิจัยของ Zhou et al. (2024) ในประเทศจีนซึ่งศึกษาการประยุกต์ใช้น้ำมันเครื่อง CK-4 5W-40 ในรถบรรทุกขนาดเล็ก ที่ติดตั้ง Diesel Particulate Filter (DPF) พบว่าน้ำมันเครื่อง CK-4 สามารถวิ่งได้ไกลถึง 30,000 กิโลเมตรต่อการเปลี่ยนถ่าย ซึ่งช่วยลดต้นทุนการบำรุงรักษาในภาพรวมได้อย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่าการศึกษาดังกล่าวจะดำเนินการกับรถบรรทุกขนาดเล็ก แต่ข้อสรุปเกี่ยวกับการยืดอายุการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง สอดคล้องกับคุณสมบัติของ CK-4 ที่มี TBN retention สูงกว่า ซึ่งส่งผลดีต่อต้นทุนการดำเนินงานระยะยาว

Macián et al. (2020) ได้รายงานเพิ่มเติมว่าการใช้น้ำมันเครื่องที่มีคุณสมบัติ friction modifier ที่ดีขึ้นสามารถลดต้นทุนการดำเนินงานของกองยานพาหนะได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในกลุ่มรถบรรทุกที่ใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลานาน ซึ่งสอดคล้องกับบริบทของอุตสาหกรรมเหมืองหินที่มีการใช้งานรถบรรทุกหนักตลอดทั้งวัน

อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยขอชี้แจงว่าตัวเลขต้นทุนในการศึกษานี้คำนวณจากข้อมูลต้นทุนเชื้อเพลิงและต้นทุนน้ำมันเครื่องที่เก็บได้จริงในช่วงการทดลอง 2 เดือนเท่านั้น ไม่ได้รวมค่าซ่อมบำรุงเครื่องยนต์ระยะยาว เนื่องจากระยะเวลาการทดลองที่ 2 เดือน (กลุ่มละ 1 เดือน) ไม่เพียงพอต่อการวัดผลกระทบต่อความเสียหายของเครื่องยนต์หรือรอบการ

ซ่อมบำรุงใหญ่ได้อย่างน่าเชื่อถือ ผู้ใช้ผลการวิจัยจึงควรพิจารณาตัวเลขต้นทุนนี้ในฐานะต้นทุนการดำเนินงานระยะสั้นเท่านั้น

3. ความสัมพันธ์ระหว่าง TBN กับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (วัตถุประสงค์ข้อที่ 3 / สมมติฐาน H₃)

ผลการวิเคราะห์ Pearson correlation พบว่าค่า TBN ของน้ำมันเครื่องภายหลังการใช้งานมีความสัมพันธ์เชิงลบในระดับสูงกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ยรายคัน ($r = -.74$, $p = .014$) กล่าวคือ น้ำมันเครื่องที่มีค่า TBN คงเหลือสูงกว่าหลังการใช้งานมีความสัมพันธ์กับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐาน H₃ ที่ตั้งไว้

ผลดังกล่าวสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าน้ำมันเครื่องที่ยังคงมีสารเติมแต่งที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งสะท้อนจากค่า TBN ที่สูง สามารถรักษาคุณสมบัติการหล่อลื่นได้ดีกว่าและส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ในเชิงบวก (Agoston et al., 2005; Tormos et al., 2017) อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยขอย้ำว่าความสัมพันธ์นี้เป็นเพียงความสัมพันธ์เชิงสหสัมพันธ์ ไม่ใช่ความสัมพันธ์เชิงเหตุและผลโดยตรง

งานวิจัยของ Macián et al., (2020) พบว่าน้ำมันเครื่อง API CK-4 มีค่า TBN retention ที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานรุ่นก่อนหน้า โดยเฉพาะภายใต้สภาวะการทำงานที่มีอุณหภูมิสูงและการปนเปื้อนของเขม่าจากการเผาไหม้ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ CK-4 สามารถรักษาคุณสมบัติการหล่อลื่นได้นานกว่าและส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิง

นอกจากนี้ ข้อมูลทางเทคนิคจากผู้ผลิตน้ำมันเครื่องชั้นนำ เช่น Eiffel Lubricants (2022); Royal Super Lubricants (2023) ระบุว่าน้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CK-4 มีค่า TBN เริ่มต้นประมาณ 9.6-9.8 mg KOH/g ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน CI-4 ที่มีค่า TBN เริ่มต้นประมาณ 7.2 mg KOH/g ความแตกต่างของค่า TBN เริ่มต้นนี้ส่งผลให้ CK-4 มีความสามารถในการต้านทานการเสื่อมสภาพและการสะสมของกรดจากกระบวนการเผาไหม้ได้ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่พบว่า CK-4 มีค่า TBN คงเหลือหลังการใช้งาน (6.1 mg KOH/g) สูงกว่า CI-4 (3.4 mg KOH/g) อย่างชัดเจน

ข้อจำกัดของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีข้อจำกัดที่ควรพิจารณาในการตีความผล ดังนี้

ประการที่หนึ่ง ขนาดกลุ่มตัวอย่างที่จำกัด ($n = 10$ คัน) อาจส่งผลต่อ Statistical Power และความสามารถในการ Generalize ผลการวิจัยไปสู่บริบทอื่นที่มีลักษณะการดำเนินงานแตกต่างกัน เช่น ประเภทรถบรรทุก อายุรถ หรือเส้นทางการขนส่ง อย่างไรก็ตาม การใช้รูปแบบการทดลองแบบสลับกลุ่ม ช่วยลดข้อจำกัดดังกล่าวลงได้ระดับหนึ่ง เนื่องจากรถแต่ละคันทำหน้าที่เป็นกลุ่มควบคุมของตัวเอง ซึ่งสอดคล้องกับคำแนะนำของ Macián et al. (2020) ที่ระบุว่าการศึกษาในภาคสนามควรใช้รูปแบบการทดลองที่สามารถควบคุมความแปรปรวนระหว่างรถแต่ละคันได้

ประการที่สอง ระยะเวลาการทดลองที่สั้นเพียง 2 เดือน (กลุ่มละ 1 เดือน) อาจไม่เพียงพอในการสะท้อนผลกระทบระยะยาวของน้ำมันเครื่องต่อสภาพเครื่องยนต์และค่าซ่อมบำรุง งานวิจัยของ Zhou et al. (2024) ที่ศึกษาการใช้น้ำมันเครื่อง CK-4 ในรถบรรทุกพบว่าการประเมินประสิทธิภาพที่แท้จริงควรมีระยะเวลาการทดลองไม่น้อยกว่า 30,000 กิโลเมตร หรือประมาณ 3-6 เดือนของการใช้งานจริง ผลการวิจัยครั้งนี้จึงควรอยู่ในขอบเขตของการเปรียบเทียบต้นทุนเชื้อเพลิงและน้ำมันเครื่องในระยะสั้นเท่านั้น

ประการที่สาม แม้จะมีการควบคุมตัวแปรแทรกซ้อนหลายประการ ได้แก่ เส้นทางการขนส่ง น้ำหนักบรรทุก และพนักงานขับรถประจำ แต่ความแปรปรวนของสภาพจราจร สภาพอากาศ และน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกันในแต่ละเที่ยวยังคงเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ไม่สมบูรณ์ในภาคสนาม งานวิจัยของ Macián et al. (2020) ชี้ให้เห็นว่าการศึกษาในภาคสนามจำเป็นต้องคำนึงถึงความแปรปรวนของปัจจัยแวดล้อมเหล่านี้ และควรใช้วิธีการทางสถิติที่เหมาะสม เช่น การวิเคราะห์แบบ mixed-effects model เพื่อควบคุมผลกระทบดังกล่าว

ประการที่สี่ ผลการวิจัยมีขอบเขตเฉพาะในบริบทของอุตสาหกรรมโรงโม่หินในจังหวัดสระบุรี ซึ่งมีสภาพแวดล้อมการทำงานที่จำเพาะ ได้แก่ การบรรทุกหนักต่อเนื่อง ฝุ่นละอองสูง และอุณหภูมิแวดล้อมสูงตลอดปี การนำผลไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทอื่นหรือภูมิภาคอื่นควรดำเนินการด้วยความระมัดระวัง

สรุป (Conclusion)

การวิจัยครั้งนี้ใช้รูปแบบการทดลองภาคสนามแบบสลับกลุ่ม เปรียบเทียบประสิทธิภาพและต้นทุนการขนส่งของรถบรรทุกที่ใช้น้ำมันเครื่อง API CK-4 และ CI-4 ในอุตสาหกรรมโรงโม่หิน จังหวัดสระบุรี ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. น้ำมันเครื่อง API CK-4 ส่งผลให้รถบรรทุกมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่าน้ำมันเครื่อง API CI-4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t(9) = -3.21, p = .011, \text{Cohen's } d = 1.02$)
2. น้ำมันเครื่อง API CK-4 ส่งผลให้ต้นทุนการขนส่งรวมต่อเที่ยวต่ำกว่าน้ำมันเครื่อง API CI-4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t(9) = -3.856, p = .004, \text{Cohen's } d = 1.22$)
3. ค่า TBN ของน้ำมันเครื่องภายหลังการใช้งานมีความสัมพันธ์เชิงลบกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ($r = -.74, p = .014$) โดยเป็นความสัมพันธ์เชิงสหสัมพันธ์ ไม่ใช่เชิงเหตุและผลโดยตรง

ผลการวิจัยโดยรวมแสดงให้เห็นว่าน้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CK-4 มีศักยภาพในการลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและต้นทุนการขนส่งในสภาพการดำเนินงานจริงของอุตสาหกรรมโรงโม่หิน อย่างไรก็ตาม ควรตีความผลภายในขอบเขตของการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้ในบริบทอื่นด้วยความระมัดระวัง

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติ

ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมโรงโม่หินและธุรกิจขนส่งที่ใช้รถบรรทุกหนักควรพิจารณาเปลี่ยนมาใช้น้ำมันเครื่องมาตรฐาน API CK-4 เพื่อลดต้นทุนการดำเนินงานด้านเชื้อเพลิง โดยเฉพาะในสภาพการทำงานที่มีการบรรทุกหนักและอุณหภูมิสูงต่อเนื่อง นอกจากนี้ควรมีการติดตามค่า TBN ของน้ำมันเครื่องอย่างสม่ำเสมอ เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดในการวางแผนรอบการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องให้เหมาะสมและประหยัดต้นทุนได้มากยิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

1. ขยายขนาดกลุ่มตัวอย่างให้ครอบคลุมรถบรรทุกหลายประเภท หลายอายุการใช้งาน และหลายเส้นทาง เพื่อเพิ่ม Statistical Power และความสามารถในการ Generalize ผลการวิจัย
2. ออกแบบการวิจัยระยะยาวไม่น้อยกว่า 1 ปี เพื่อประเมินผลกระทบของมาตรฐานน้ำมันเครื่องต่อค่าซ่อมบำรุงเครื่องยนต์ อายุการใช้งานของชิ้นส่วน และต้นทุนการดำเนินงานรวมในระยะยาว
3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง TBN กับประสิทธิภาพเชื้อเพลิงในเชิงเหตุและผลโดยใช้การออกแบบการทดลองที่ควบคุมตัวแปรแทรกซ้อนได้อย่างเข้มงวดยิ่งขึ้น เช่น การทดสอบในห้องปฏิบัติการควบคู่กับภาคสนาม
4. เปรียบเทียบมาตรฐานน้ำมันเครื่องรุ่นใหม่ล่าสุด เช่น API CK-4 กับ FA-4 ในบริบทของรถบรรทุกรุ่นใหม่ที่มีออกแบบมารองรับน้ำมันความหนืดต่ำ เพื่อประเมินศักยภาพในการประหยัดพลังงานในอนาคต
5. ศึกษาผลกระทบของมาตรฐานน้ำมันเครื่องต่อการปล่อยมลพิษทางอากาศ เช่น PM_{2.5} และ NO_x ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญด้านสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมขนส่งและเหมืองแร่

เอกสารอ้างอิง (References)

- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2563). *สถิติอุตสาหกรรมเหมืองแร่ประเทศไทย ปี 2562*. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. (2565). *รายงานสถิติการขนส่งและจราจรประเทศไทย พ.ศ. 2564*. กระทรวงคมนาคม.
- Agoston, A., Ötsch, C., & Jakoby, B. (2005). Viscosity sensors for engine oil condition monitoring—Application and interpretation of results. *Sensors and Actuators A: Physical*, 121(2), 327–332. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.02.024>
- American Petroleum Institute. (2017). *API CK-4 and FA-4: New heavy duty diesel engine oil categories*. API Publishing Services.
- ASTM International. (2016). *ASTM D4485-16: Standard specification for performance of engine oils*.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Eiffel Lubricants. (2022). *Marvela Xtreme 10W30 CK-4 technical data sheet*. <https://eiffellubricants.com>
- Hamrock, B. J., Schmid, S. R., & Jacobson, B. O. (2004). *Fundamentals of fluid film lubrication* (2nd ed.). Marcel Dekker.
- Holmberg, K., Andersson, P., Nylund, N. O., Mäkelä, K., & Erdemir, A. (2014). Global energy consumption due to friction in trucks and buses. *Tribology International*, 78, 94–114. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.01.011>
- Liimatainen, H., Hovi, J. P., & Pöllänen, M. (2012). Analysis of driving behaviour and fuel saving potential in truck transport. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 48, 1063–1073. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1083>
- Macián, V., Tormos, B., Bastidas, S., & Pérez, T. (2020). Improved fleet operation and maintenance through the use of low viscosity engine oils: Fuel economy and oil performance. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 22(2), 201–211. <https://doi.org/10.17531/ein.2020.2.2>
- Mufti, L. J., Pratami, D., & Tripiawan, W. (2018). Quality metric design as a tool to control the quality of project. *PMI Indonesia Chapter*. <https://pmi-indonesia.org/blog/quality-metric-design-as-a-tool-to-control-the-quality-of-project-8055>
- Royal Super Lubricants. (2023). *Royal Super Lubricants engine oil 10W-30 API CK-4/SN technical specification*. <https://royalsuper.us>
- Santos, A., & Souza, P. (2025). Desafios e soluções: Comparativo de performance dos lubrificantes para veículos pesados para cenários brasileiros futuros (Challenges and solutions: Comparative performance of lubricants for heavy-duty vehicles in future Brazilian scenarios). *Proceedings of the SIMEA 2024 Symposium*. <https://doi.org/10.5151/simea2024-PAP110>

Southwest Research Institute. (n.d.). *Diesel engine oil engine testing*.

<https://www.swri.org/markets/automotive-transportation/fuels-lubricants/lubricant-testing/diesel-engine-oil-engine-testing>

Tormos, B., Ramirez, L., Johansson, J., Björling, M., & Larsson, R. (2017). Fuel consumption and friction benefits of low viscosity engine oils for heavy duty applications. *Tribology International*, 110, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.02.007>

Usman, A., & Park, C. W. (2021). The effect of modern engine oils on fuel efficiency in heavy-duty diesel engines. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 14(2), 85–98.

Zhou, L., Wang, Y., Liu, X., Zhang, W., & Chen, H. (2024). Application of CK-4 5W-40 engine oil on DPF light trucks. *Lubricating Oil*, 39(4), 4–10. <https://doi.org/10.19532/j.cnki.cn21-1265/tq.2024.04.002>