

การพัฒนาเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัด

สตัยา บุญรัตนชู, วราภรณ์ รัศมีผะกาย, วชิราภรณ์ ปิสิโตร และ ทรงสุตา พรหมทอง*

สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

*อีเมลของผู้ประพันธ์บรรณกิจ: songsuda.p@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลอ้างอิงมาตรฐาน EN14112 ซึ่งเป็นหนึ่งในข้อกำหนดด้านคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนดโดยกรมธุรกิจพลังงาน พ.ศ. 2562 เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมี 8 ช่องตรวจวัด สามารถตรวจวัดได้หลายตัวอย่างในเวลาเดียวกัน สามารถบันทึกค่าการนำไฟฟ้าตามข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐาน โดยอาศัยหลักการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของไอระเหยที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการออกซิเดชัน ใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ PID และควบคุมการไหลของอากาศแห้งผ่านโซลินอยด์วาล์วแบบแยกอิสระในแต่ละช่องตรวจวัด วิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าด้วยวงจรกระแสสลับและใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F252 ส่งข้อมูลการตรวจวัดไปยังคอมพิวเตอร์ผ่าน RS-232/USB ประมวลผลด้วยโปรแกรม OxyGraph V1.0 ที่พัฒนาขึ้น สามารถคำนวณค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในหน่วยชั่วโมงได้โดยอัตโนมัติ ผลการทดสอบแสดงค่าความเที่ยงของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นด้วยสถิติค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%RSD) มีค่าเท่ากับ 1.40 และมีความสัมพันธ์เชิงเส้นสูงเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบจากเครื่องที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องเชิงพาณิชย์ พิจารณาด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson Product Moment Correlation Coefficient, r) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9994 และพิจารณาด้วยสถิติ Bland-Altman Plot ความสอดคล้องกันในช่วงขอบเขต Limits of Agreement ± 1.96 SD ซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเครื่องที่พัฒนาขึ้นในการใช้งานจริงเป็นการลดต้นทุนจากการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศ

คำสำคัญ: น้ำมันไบโอดีเซล; เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน; มาตรฐาน EN 14112; ค่าการนำไฟฟ้า; ระบบตรวจวัด; เครื่องต้นแบบ; การพัฒนาเครื่องมือ; ไมโครคอนโทรลเลอร์

Development of an Eight-Channel Oxidation Stability Analyzer for Biodiesel

Sathaya Bunratchoo, Waraporn Ratsameepakai,
Wachiraporn Pisitaro and Songsuda Promthong*

*Office of Scientific Instrument and Testing, Prince of Songkla University, Hat Yai Campus,
Hat Yai, Songkla 90110, Thailand*

*Corresponding author's e-mail: songsuda.p@psu.ac.th

Abstract

This research aims to develop an oxidation stability analyzer for biodiesel based on the EN 14112 standard, which is one of the quality requirements specified by the Department of Energy Business (2019). The developed prototype consists of eight measuring cells that can simultaneously analyze multiple samples. The measurement system records the conductivity in accordance with the standard method by monitoring the change in vapor conductivity generated during the oxidation process. The instrument employs a PID temperature control system and independently regulated dry-air flow through solenoid valves for each measurement cell. The conductivity is measured using an AC circuit and processed by a PIC18F252 microcontroller, which transmits the data to a computer via an RS-232/USB interface. Data acquisition and analysis are performed using the developed software OxyGraph V1.0, which automatically calculates the oxidation stability in hours. The precision of the developed instrument, expressed as the relative standard deviation (%RSD), was 1.40%. A strong linear correlation was observed between the results obtained from the developed instrument and those from a commercial analyzer, as indicated by the Pearson product-moment correlation coefficient ($r = 0.9994$). Furthermore, the Bland-Altman analysis demonstrated good agreement within the limits of agreement (± 1.96 SD), indicating that the developed analyzer provides reliable performance suitable for practical applications. This system offers a cost-effective alternative to imported instruments and demonstrates strong potential for domestic implementation.

Keywords: Biodiesel; Oxidation Stability; EN 14112; Electrical Conductivity; Measurement System; Prototype Analyzer; Instrument Development; Microcontroller

บทนำ

พลังงานทดแทนเป็นพลังงานสะอาดที่สามารถทดแทนเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมได้อย่างยั่งยืน หนึ่งในพลังงานทดแทนที่สำคัญคือไบโอดีเซล (Biodiesel) ซึ่งผลิตได้จากน้ำมันพืชหรือน้ำมันใช้แล้วโดยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ที่เปลี่ยนกรดไขมันให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Methyl Esters: FAME) ไบโอดีเซลมีสมบัติการเผาไหม้ที่ดี เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ (Knothe, 2017) อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญของไบโอดีเซลคือความไม่เสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาเชื้อเพลิง โดยทั่วไปความเสถียรต่อการเกิดออกซิเดชันของไบโอดีเซลขึ้นอยู่กับชนิดและสัดส่วนของกรดไขมันในวัตถุดิบตั้งต้น น้ำมันที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงจะเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายกว่า เนื่องจากพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Agarwal, 2007) การเสื่อมสภาพนี้นำไปสู่การเกิดสารอนุมูลออกซิเจน เช่น เพอร์ออกไซด์ (Peroxide) อัลดีไฮด์ (Aldehydes) และกรดอินทรีย์ ซึ่งมีผลต่อการกัดกร่อนของเครื่องยนต์และการอุดตันของหัวฉีดเชื้อเพลิง (Altarazi et al., 2022) โดยเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบและไบโอดีเซลจากปาล์มสามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้ เมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์มดิบมีเสถียรภาพในการออกซิเดชันที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันปาล์มกลั่น (Yang et al., 2013) เนื่องจากมีวิตามินอีซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติในน้ำมันปาล์มทำให้ไบโอดีเซลที่ได้จากเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบมีค่าเสถียรภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสอดคล้องตามมาตรฐาน EN 14112 สำหรับไบโอดีเซล ซึ่งกำหนดให้ระยะเวลาการเหนี่ยวนำ (Induction Period) ที่ประเมินด้วยวิธี Rancimat เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation Stability) มีค่าไม่น้อยกว่า 6 ชั่วโมง โดยอาศัยการเพิ่มอุณหภูมิและให้อากาศอย่างต่อเนื่องผ่านตัวอย่าง อากาศพาออกซิเจนที่ระเหยจากภาชนะบรรจุตัวอย่างไปยังภาชนะบรรจุน้ำกลั่นจากนั้นจะวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำโดยค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันเวลาที่เกิดการแตกตัวของออกซิเจน วิธีการดังกล่าวมีการยอมรับอย่างแพร่หลาย (Sarin et al., 2010) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของน้ำมันที่จะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วได้ยางเหนียวทำให้ไบโอดีเซลเกิดความไม่เสถียรเช่นเดียวกันกับน้ำมันตามธรรมชาติและไขมันจากสัตว์ เมื่อจัดเก็บเป็นเวลานานจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นเกิดการแปรสภาพอย่างช้า ๆ ซึ่งมีผลกระทบต่อห้องเผาไหม้และการเก็บสำรองน้ำมันซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพต่อการจัดเก็บ (Loh et al., 2006) ส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายของไบโอดีเซล เช่น เหม็นหืนง่าย หรือ ค่าความเป็นกรดเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนในเครื่องยนต์

อย่างไรก็ตามเครื่อง Rancimat เป็นเครื่องมือเชิงพาณิชย์ที่มีมูลค่าสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ส่งผลให้ต้นทุนการทดสอบสูง จากการสืบค้นข้อมูลพบว่าเครื่อง Rancimat รุ่น 892 ยี่ห้อ Metrohm มีราคาจำหน่ายมากกว่าหนึ่งล้านบาท (Global Scientific, 2025) ในขณะที่เครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน รุ่น OST-R2 ยี่ห้อ YUYANG มีราคาจำหน่ายมากกว่าสี่แสนบาท (Flammability Testing Equipment, 2025) ทั้งนี้ราคาของเครื่องมือดังกล่าวขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเฉพาะของเครื่อง อุปกรณ์เสริม ค่าขนส่ง และค่าภาษีนำเข้า นอกจากนี้การบำรุงรักษาและการจัดหาอะไหล่ของเครื่องมือดังกล่าวยังมีต้นทุนสูงและใช้เวลานาน อีกทั้งในกรณีที่มีจำนวนตัวอย่างและผู้ให้บริการทดสอบไม่มากจะส่งผลให้ต้นทุนการดำเนินงานต่อการทดสอบสูงขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญของหน่วยงานบริการวิเคราะห์ทดสอบในประเทศ รวมทั้งสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งเป็นหน่วยงานให้บริการทดสอบตัวอย่างทางวิทยาศาสตร์ที่มีภารกิจสนับสนุนการวิจัยและบริการทดสอบที่หลากหลายรวมทั้งด้านพลังงานทดแทนให้แก่กักวิจัยทั้งภายในภายนอกมหาวิทยาลัยและภาคเอกชน ซึ่งต้องการทดสอบตัวอย่างตามวิธีการทดสอบมาตรฐานที่สามารถอ้างอิงไปยังนานาชาติ หนึ่งในวิธีการทดสอบที่ผู้ให้บริการต้องการคือการวิเคราะห์ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซล ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ของไบโอดีเซลที่ผลิตเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่ (กรมธุรกิจพลังงาน, 2562)

ดังนั้นเพื่อตอบสนองพันธกิจของสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบในการให้บริการทดสอบไบโอดีเซลตามมาตรฐานที่กำหนด คณะผู้วิจัยจึงพัฒนาเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไบโอดีเซลอาศัยหลักการเดียวกับเครื่อง Rancimat และปรับปรุงให้สามารถทดสอบตัวอย่างได้พร้อมกันหลายชุดภายในคราวเดียวกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและมีศักยภาพในการลดการพึ่งพาการนำเข้า ส่งเสริมการพึ่งพาตนเองด้านเครื่องมือวิเคราะห์ของประเทศ เครื่องต้นแบบนี้จะเป็นประโยชน์โดยตรงต่อการให้บริการทดสอบของสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เพื่อการบริการทางวิชาการและอุตสาหกรรมในประเทศอย่างยั่งยืน โดยอ้างอิงตามวิธีมาตรฐาน EN14112

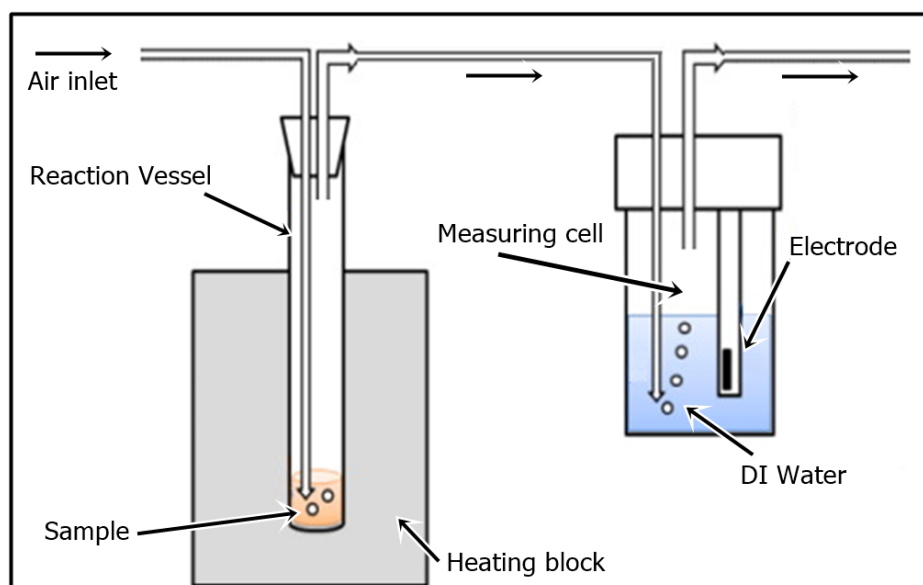
วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนาเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัดตามมาตรฐาน EN14112
2. เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัด

ระเบียบวิธีวิจัย

หลักการทำงานของเครื่อง

ตามมาตรฐาน EN 14112 เครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน กำหนดให้ปล่อยอากาศแห้งโดยออกซิเจนในอากาศจะทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมาตามท่อด้วยอัตราการไหลคงที่ 10 ลิตรต่อชั่วโมง ผ่านเข้ามาตามท่อแก้วไปยังหลอดที่บรรจุตัวอย่างไบโอดีเซลไว้ในปริมาณ 3.00 กรัม โดยให้ความร้อนกับหลอดตัวอย่างที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ซึ่งในการทดลองนี้เลือกใช้ฮีตติ้งบล็อกเป็นตัวให้ความร้อน โดยตัวฮีตติ้งบล็อกดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ไว้ที่ 110 ± 0.1 องศาเซลเซียส เมื่อตัวอย่างไบโอดีเซลเกิดกระบวนการออกซิเดชัน ไอระเหยซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะถูกพาออกมาโดยอากาศที่ผ่านเข้าไป และออกมาตามท่ออากาศผ่านไปยัง Vessel ที่บรรจุน้ำกลั่น ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ซึ่งมีอิเล็กโทรดจุ่มอยู่ในน้ำเพื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าและบันทึกค่าการนำไฟฟ้าตลอดการทดลอง แสดงดังภาพที่ 1



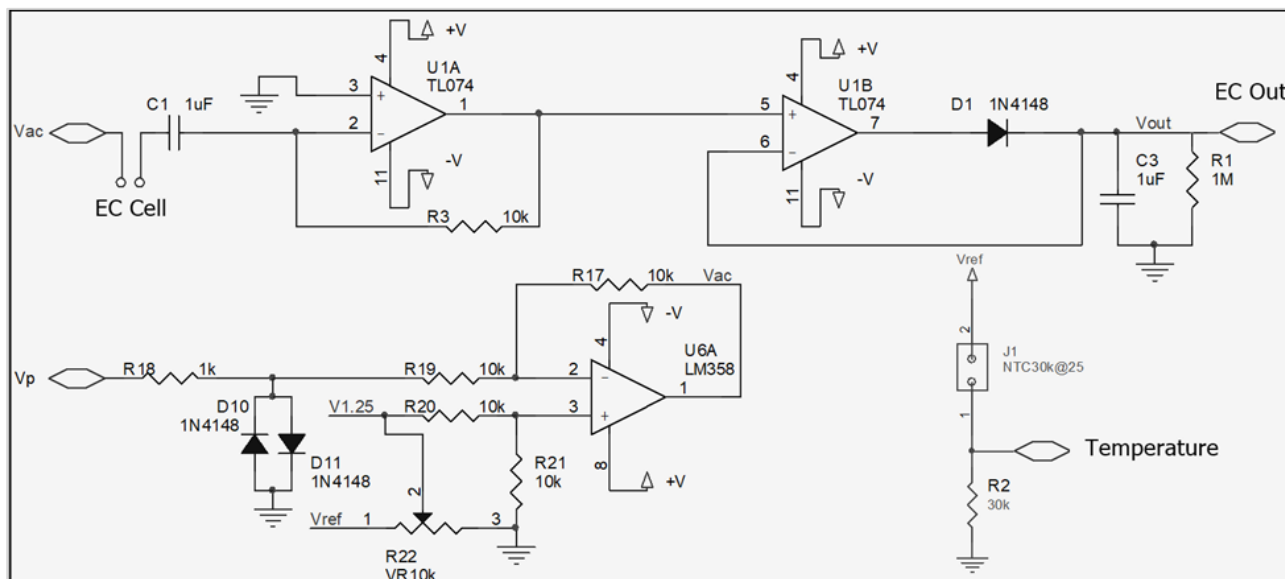
ภาพที่ 1 แผนภาพเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซล อ้างอิงตามวิธีมาตรฐาน EN14112

ตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ศึกษา

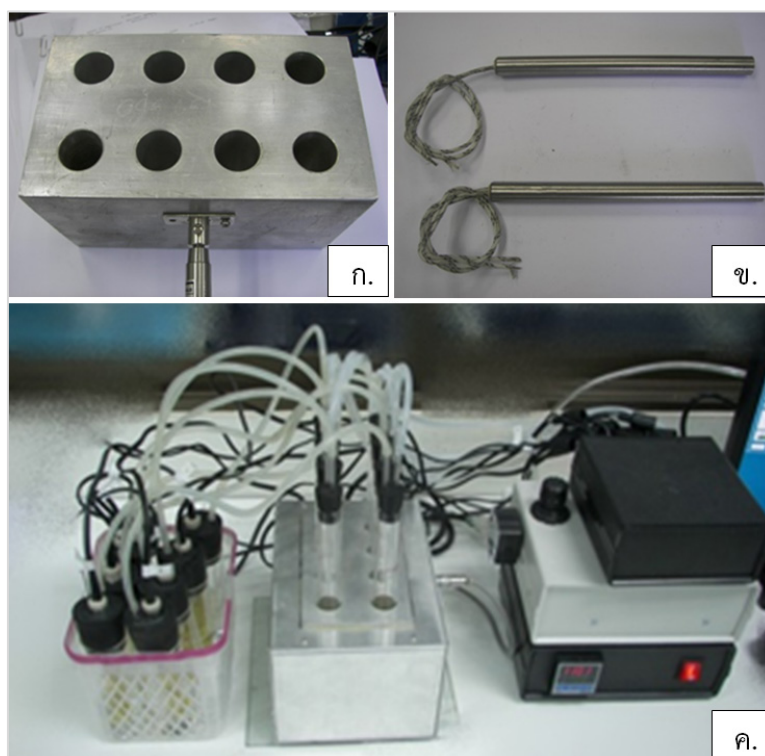
1. ตัวอย่างที่ใช้ศึกษาคือน้ำมันไบโอดีเซลได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทผู้ผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจังหวัดกระบี่
2. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่มีค่าการนำไฟฟ้า 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ยี่ห้อ EUTECH ซื้อจากบริษัท ยู.พี.มาร์เก็ตติ้งเอนเนอรัล ซัพพลาย จำกัด ประเทศไทย
3. อิเล็กโทรดวัดความนำไฟฟ้า ยี่ห้อ EUTECH รุ่น CONSEN91B ซื้อจากบริษัท ยู.พี.มาร์เก็ตติ้งเอนเนอรัล ซัพพลาย จำกัด ประเทศไทย
4. น้ำปราศจากไอออน ผลิตใช้เองในห้องปฏิบัติการสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบโดยใช้เครื่องผลิตยี่ห้อ Millipore SAS รุ่น Milli-Q Direct 8 System ประเทศฝรั่งเศส
5. อากาศปราศจากความชื้นหรืออากาศแห้ง (Air Zero) ขนาด 7 ลูกบาศก์เมตรต่อท่อ ซื้อจากบริษัทลินด์ ประเทศไทยจำกัด มหาชน

ออกแบบวงจรวัดค่าการนำไฟฟ้า

การวัดค่าการนำไฟฟ้าออกแบบโดยใช้วงจรกระแสสลับในการวัดเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดโพลาไรเซชันของอิเล็กโทรดและปฏิกิริยาเคมีที่อิเล็กโทรด ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าการวัดคลาดเคลื่อน การวัดโดยใช้หลักการวัดแบบกระแสสลับจะได้ค่าการนำไฟฟ้าที่เป็นเชิงเส้นและแม่นยำมากที่สุด (Chassagne et al., 2016) โดยออกแบบแหล่งจ่ายกระแสสลับอ้างอิง 0.7 Volt (Peak to Peak) ความถี่ 1 kHz ซึ่งเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่ใช้ค่า 1 - 3 kHz เนื่องจากไอออนไม่มีเวลาพอที่จะสะสมตัวที่ขั้วใดขั้วหนึ่ง ลดการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarization) ไม่มีปฏิกิริยาเคมีถาวรเกิดขึ้นที่อิเล็กโทรด (Mizuhata, 2022) ดังนั้นค่าที่วัดได้จะเป็นค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจริง ไม่ถูกรบกวนจากปัจจัยภายนอก การสร้างสัญญาณกระแสสลับอ้างอิงโดยไม่โครคอนโทรลเลอร์ (ภาพที่ 2) ขยายสัญญาณและปรับระดับแรงดันโดยวงจรขยาย U6A การวัดค่าการนำไฟฟ้าจะอาศัยแรงดันอ้างอิงกระแสสลับที่ออกแบบป้อนให้แก่อิเล็กโทรดแล้ววัดสัญญาณที่ได้โดยวงจรขยายสัญญาณป้อนกลับแบบลบ U1A และนำสัญญาณกระแสสลับที่ได้แปลงเป็นกระแสตรงโดย U1B ระดับแรงดันที่ได้จะแปรผันตรงกับค่าการนำไฟฟ้า อย่างไรก็ตามค่าการนำไฟฟ้าที่วัดจะเบี่ยงเบนตามอุณหภูมิเช่นกัน ดังนั้นเพื่อให้การวัดที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิน้อยที่สุด อิเล็กโทรดวัดค่าการนำไฟฟ้ามักจะติดตั้งหัววัดอุณหภูมิมาด้วย โดยปกติจะเป็นหัววัดชนิดสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นลบ (Negative Temperature Coefficient: NTC) ค่าความต้านทานของ NTC จะไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามสามารถปรับวงจรให้สามารถวัดค่าอุณหภูมิที่เป็นเชิงเส้นครอบคลุมช่วงการใช้งานได้โดยต่ออนุกรมกับตัวต้านทานที่มีค่าเท่าค่าความต้านทานของ NTC ณ อุณหภูมิที่กำหนดหรือจุดกึ่งกลางของช่วงการใช้งาน จะทำให้แรงดันที่ได้เทียบกับอุณหภูมิมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น (Texas Instruments, 2021) โดยจะนำข้อมูลอุณหภูมินี้ไปคำนวณชดเชยค่าการนำไฟฟ้าให้เทียบเท่าที่อุณหภูมิอ้างอิงที่ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2 วงจรวัดค่าการนำไฟฟ้าที่ออกแบบแบบหนึ่งช่องตรวจวัด



ภาพที่ 3 (ก) บล็อกให้ความร้อน (ข) แท่งให้ความร้อน (ค) บล็อกให้ความร้อนและชุดควบคุม

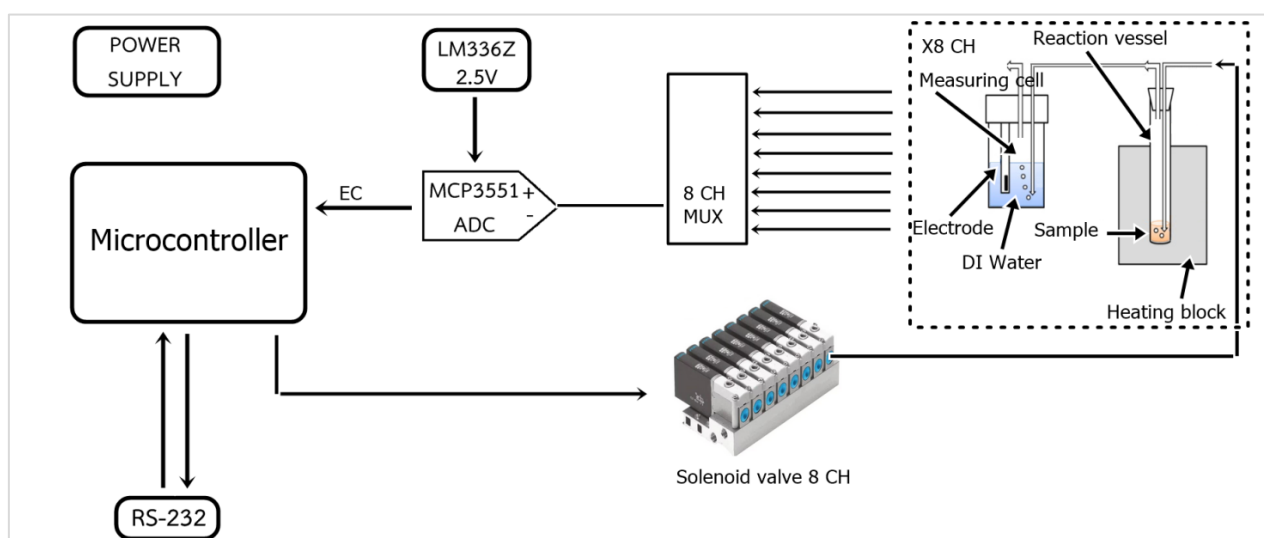
ออกแบบและสร้างส่วนให้ความร้อนแก่น้ำมันตัวอย่าง

ส่วนให้ความร้อนออกแบบโดยใช้แท่งอะลูมิเนียมหล่อขนาด 4x4x6 นิ้ว และเจาะเป็นหลุมจำนวน 8 หลุม เส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมขนาด 21.8 มิลลิเมตร ความลึก 60.0 มิลลิเมตร เพื่อบรรจุหลอดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.7 มิลลิเมตร ความสูง 175.0 มิลลิเมตร ใส่ตัวอย่างทดสอบน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ต้องให้ความร้อนคงที่ และต้องสามารถปรับค่าความละเอียดของอุณหภูมิได้ถึง ± 0.1 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงเลือกแท่งอะลูมิเนียมมาเป็นวัสดุที่ใช้ทำฮีตเตอร์บล็อก ทั้งนี้เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นตัวนำความร้อนที่ดี อะลูมิเนียมในแท่งอะลูมิเนียมจะกระจาย

อย่างสม่ำเสมอและรวดเร็วเป็นผลดีต่อการทดสอบ การให้ความร้อนแก่แท่งอะลูมิเนียมทำได้โดยการฝังฮีตเตอร์สำหรับให้ความร้อนและติดตั้งหัววัดอุณหภูมิชนิด RTD PT100 เพื่อวัดอุณหภูมิของบล็อกให้ความร้อน การควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัลพีไอดี มีการห่อหุ้มบล็อกให้ความร้อนด้วยฉนวนกันความร้อนและปิดผนึกด้วยแผ่นอะลูมิเนียม ดังภาพที่ 3

การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของระบบ

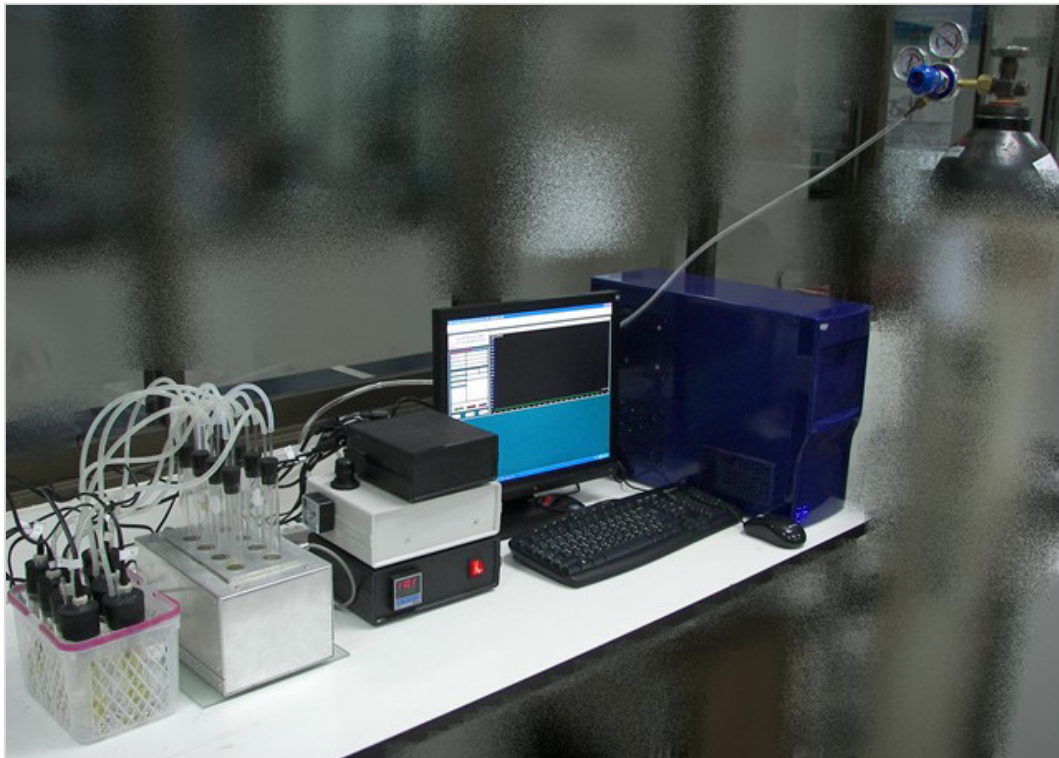
วงจรทั้งหมดจะถูกควบคุมและประมวลผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC18F252 เป็นตัวประมวลผลสัญญาณที่ตรวจวัดได้จาก PIC18F252 ได้แก่ค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิของน้ำ DI Water ในแต่ละช่องตรวจวัดจะถูกส่งให้กับคอมพิวเตอร์ผ่านทาง RS-232 เพื่อทำการบันทึกและประมวลผล นอกจากนี้ PIC18F252 ยังทำหน้าที่รับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการทำงานของวาล์วปล่อยอากาศทั้ง 8 ช่องอย่างอิสระ โดยไดอะแกรมการทำงานของระบบแสดงดังภาพที่ 4



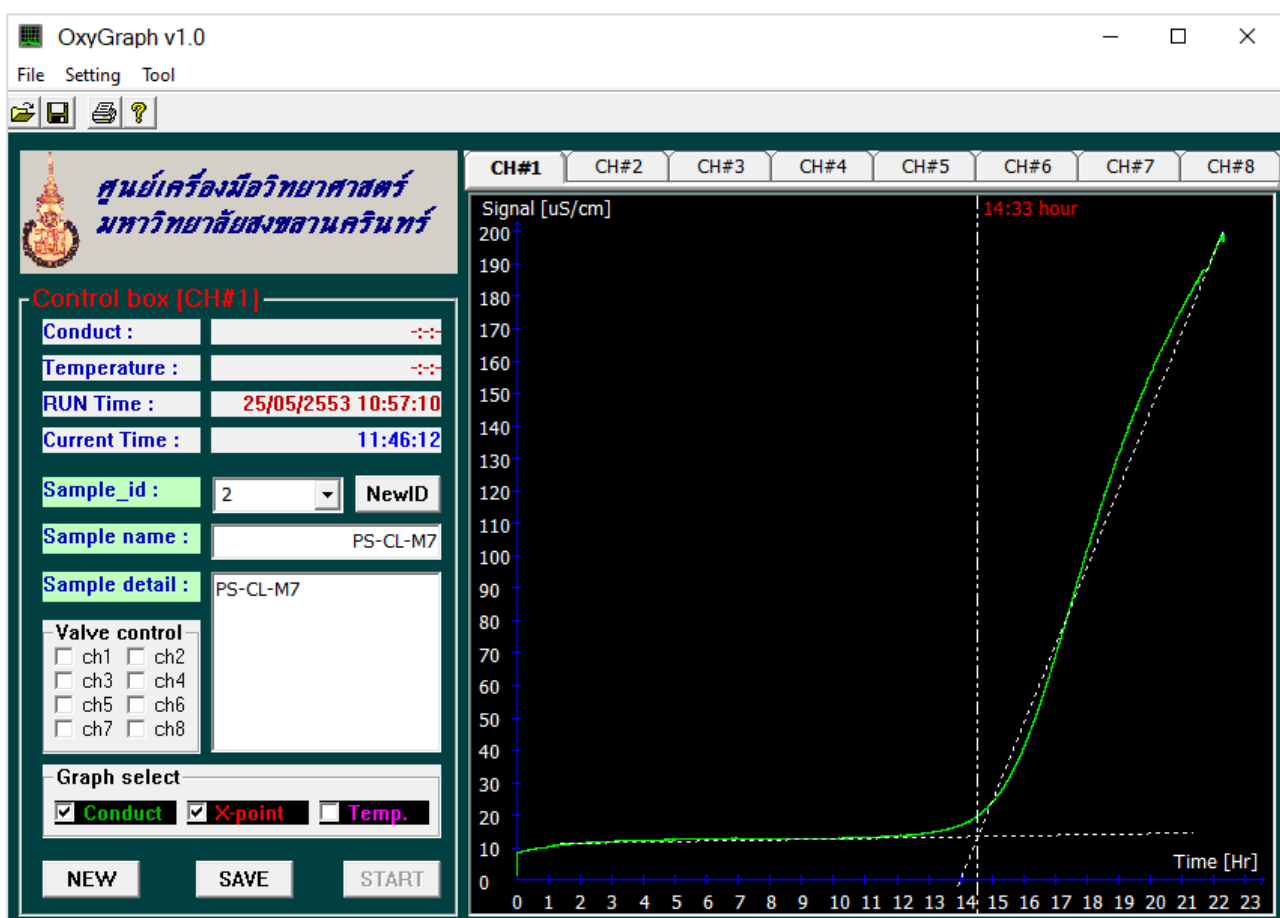
ภาพที่ 4 แผนผังวงจรควบคุมของเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัด

การพัฒนาโปรแกรมควบคุมและส่วนติดต่อผู้ใช้พัฒนาโดยใช้ MS Visual Basic 6.0 ซึ่งสามารถสร้างส่วนติดต่อผู้ใช้ในรูปแบบกราฟิกได้ ทำให้ผู้ใช้งานมีความสะดวกต่อการใช้งาน ผู้ใช้งานสามารถบันทึกชื่อและรายละเอียดของตัวอย่างแยกย่อยได้ทั้ง 8 ช่อง ข้อมูลการทดสอบได้แก่ค่าการนำไฟฟ้า อุณหภูมิของเซลล์ จะถูกบันทึกตามช่วงเวลาโดยอัตโนมัติ โดยข้อมูลจะถูกจัดเก็บในฐานข้อมูลแบบ MS Access (MDB) สามารถเรียกข้อมูลมาดูย้อนหลังและทำการวิเคราะห์ข้อมูลใหม่ได้ ผู้วิจัยได้ตั้งชื่อโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ว่าโปรแกรม OxyGraph V1.0 เครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัดที่พัฒนาขึ้น แสดงดังภาพที่ 5

ข้อมูลรายละเอียดของตัวอย่างจะจัดเก็บในฐานข้อมูลแยกเป็นตารางชื่อ sample_table ซึ่งจะเก็บรายละเอียดของหมายเลขตัวอย่าง ชื่อตัวอย่าง รายละเอียดอื่น ๆ และวันที่ทดสอบ ข้อมูลจากอิเล็กทรอนิกส์จะประกอบไปด้วยค่าการนำไฟฟ้าและอุณหภูมิจะถูกจัดเก็บในตารางชื่อ data_table พร้อมด้วยข้อมูลของเวลาที่บันทึกข้อมูลดังนั้นเมื่อนำข้อมูลใน data_table มาเขียนกราฟเทียบกับเวลาจะความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลา หน้าต่างควบคุมหลักของโปรแกรม OxyGraph V1.0 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับเวลาแสดงผลเป็นชั่วโมง:นาที แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 เครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัดที่พัฒนาขึ้น



ภาพที่ 6 หน้าต่างควบคุมหลักของโปรแกรม OxyGraph V1.0 ที่พัฒนาขึ้น

การเปรียบเทียบอุณหภูมิของฮีตติ้งบล็อกและการทวนสอบอัตราการไหลของอากาศ

ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่แท้จริงของตัวอย่างและอุณหภูมิของฮีตติ้งบล็อกเรียกว่าค่าปรับแก้อุณหภูมิ (ΔT) การหาค่า ΔT ดำเนินการโดยใช้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิภายนอกที่ผ่านการสอบเทียบตามมาตรฐาน เปิดฮีตติ้งบล็อกให้อุณหภูมิคงที่ที่ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมน้ำมันทนความร้อนปริมาณ 5 กรัม ลงในหลอดตัวอย่าง และสอดเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิผ่านฝาปิดเข้าไปในหลอดตัวอย่าง โดยจัดวางปลายเซ็นเซอร์ให้สัมผัสกับบริเวณก้นหลอดตัวอย่าง ใส่ชุดทดสอบทั้งหมดลงในฮีตติ้งบล็อกและต่อท่ออากาศ เมื่ออุณหภูมิที่วัดได้จากเซ็นเซอร์มีค่าคงที่ ให้คำนวณค่า ΔT จากสมการ $\Delta T = T_{\text{Block}} - T_{\text{Sensor}}$ โดย T_{Block} คืออุณหภูมิของฮีตติ้งบล็อก และ T_{Sensor} คืออุณหภูมิที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ภายนอก จากนั้นนำค่า ΔT ที่ได้ไปใช้ในการปรับแก้อุณหภูมิของเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัลพีไอดีเพื่อให้ค่าอุณหภูมิของฮีตติ้งบล็อกสอดคล้องกับอุณหภูมิจริงของตัวอย่าง และจากการทดสอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ค่า ΔT มีค่าเท่ากับ 0.3 องศาเซลเซียส สำหรับการทวนสอบอัตราการไหลของอากาศให้อยู่ในช่วง 10 ± 1 L/h ตามข้อกำหนดของวิธีมาตรฐาน EN 14112 ใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบดิจิทัลที่ผ่านการสอบเทียบ โดยทำการวัดทั้งตำแหน่งก่อนเข้าสู่ Reaction Vessel และตำแหน่งหลังออกจาก Measuring Cell เพื่อทวนสอบความสม่ำเสมอของอัตราการไหลและตรวจสอบการรั่วไหลของระบบ ซึ่งค่าที่วัดได้จากทั้งสองตำแหน่งควรมีค่าใกล้เคียงกัน

ขั้นตอนทดสอบการทำงานของเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัด

การทดสอบการทำงานและทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นได้ทำการทดสอบในสองขั้นตอนด้วยกันคือการทดสอบการตรวจวัดของแต่ละช่องตรวจวัดโดยใช้ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลตัวอย่างเดียวกันทดสอบทั้ง 8 ช่องตรวจวัด อีกขั้นตอนคือการทดสอบความเที่ยงของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ตัวอย่างเดียวกันทำการทดสอบด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้นเทียบกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์ โดยตัวอย่างก่อนทดสอบจัดเก็บในภาชนะปิดสนิทเพื่อป้องกันแสงในตู้เย็น 4 องศาเซลเซียส การทดสอบแต่ละครั้งตามวิธีมาตรฐาน EN14112 เริ่มจากการสอบเทียบหัววัดค่าการนำไฟฟ้าทั้ง 8 ช่องตรวจวัด โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่มีค่าการนำไฟฟ้า 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ จากนั้นบรรจุ DI Water ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใน Measuring Cell ขั้นตอนนี้ค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นที่ตรวจวัดได้ควรจะได้ใกล้เคียง 0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ปรับอัตราการไหลของอากาศแห้ง ให้ได้อัตราการไหลคงที่ 10 ลิตรต่อชั่วโมง ตั้งค่าอุณหภูมิของตัวฮีตติ้งบล็อกให้ควบคุมอุณหภูมิคงที่ไว้ที่ 110 ± 0.1 องศาเซลเซียส ชั่งตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลน้ำหนัก 3.00 กรัม ใส่หลอดตัวอย่าง (Reaction Vessel) โดยให้ความร้อนกับหลอดตัวอย่างที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เมื่อตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลเกิดกระบวนการออกซิเดชัน ไอร่ะเหยซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะถูกพาออกมาโดยอากาศที่ผ่านเข้าไปและออกมาตามท่ออากาศผ่านไปยัง หลอดบรรจุ DI Water ใน Measuring Cell เพื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าและบันทึกค่าการนำไฟฟ้าตลอดการทดลองผ่านโปรแกรม OxyGraph V1.0

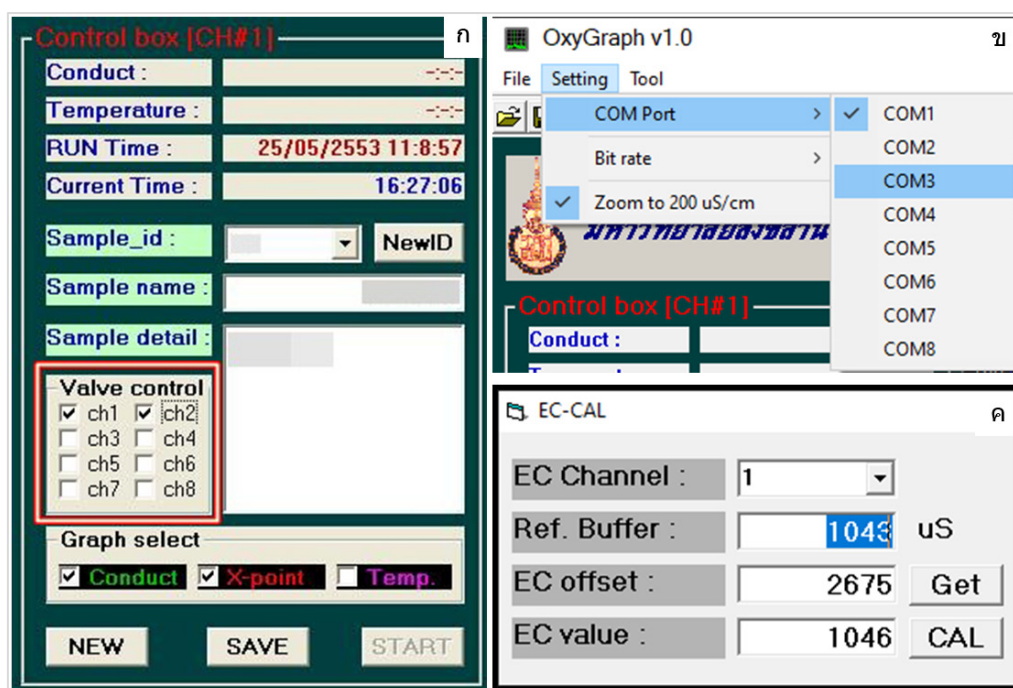
การศึกษาความเที่ยงของเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซล 8 ช่องตรวจวัดที่พัฒนาขึ้น

ศึกษาความเที่ยงด้วยค่าทางสถิติ (Miller et al., 2018) ซึ่งพิจารณาจากค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%RSD) จากการทดสอบตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลตัวอย่างเดียวกันในเวลาเดียวกันของทั้ง 8 ช่องตรวจวัด และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากเครื่องที่พัฒนาขึ้นเทียบกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์ด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้น Regression Line โดยพิจารณาความสัมพันธ์ด้วยสถิติสหสัมพันธ์เพียร์สันจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) และวิเคราะห์ความสอดคล้องเชิงระบบโดยใช้สถิติ Bland-Altman (Bland et al., 1999)

ผลการวิจัย

เครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัดที่พัฒนาขึ้น

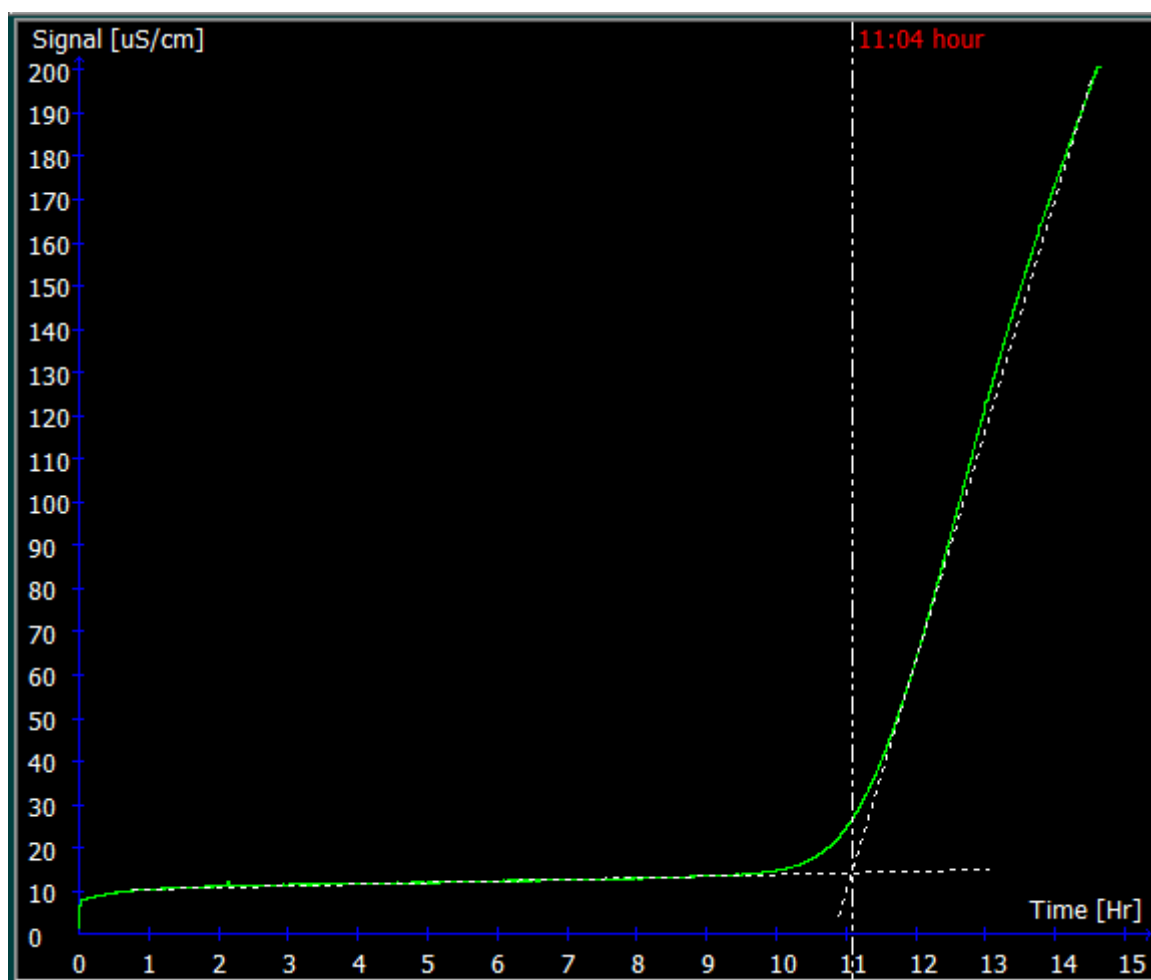
เครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัด ที่พัฒนาขึ้น ประกอบไปด้วยหลุมสำหรับให้ความร้อนแก่ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลจำนวน 8 หลุม ควบคุมอุณหภูมิด้วยดิจิตอล PID Controller ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างได้ในช่วง 50 - 150 องศาเซลเซียส สามารถทำการปรับค่า PID ได้โดยอัตโนมัติ (Auto Tune) เพื่อให้ได้อุณหภูมิคงที่และยังสามารถปรับค่าแก๊สของอุณหภูมิให้ถูกต้องจากการสอบเทียบได้ มีอิเล็กทรอนิกส์การนำไฟฟ้าจำนวน 8 หัววัด สำหรับวัดค่าการนำไฟฟ้าและแปลงค่าเป็นดิจิตอล ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F252 และโปรแกรม OxyGraph V1.0 โดยสามารถทดสอบตัวอย่างได้ 8 ตัวอย่างพร้อมกันและเป็นอิสระต่อกัน นั่นคือสามารถเริ่มทดสอบตัวอย่างพร้อมหรือไม่พร้อมกันก็ได้ รวมทั้งหากช่องตรวจวัดใดทดสอบเสร็จก่อนสามารถเปลี่ยนตัวอย่างใหม่และเริ่มทดสอบตัวอย่างถัดไปได้ทันที แม้ว่าตัวอย่างในช่องตรวจวัดอื่นยังไม่เสร็จสิ้นกระบวนการทดสอบก็ตาม โปรแกรม OxyGraph V1.0 มีหน้าต่างควบคุมหลักของโปรแกรม OxyGraph V1.0 ประกอบด้วยหน้าต่างหลักแสดงผลการการตรวจวัดของแต่ละช่องและสิ่งการโซลินอยด์วาล์ว หน้าต่างตั้งค่าการเชื่อมต่อ หน้าต่างสอบเทียบค่าการนำไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 หน้าต่างควบคุมหลักของโปรแกรม OxyGraph V1.0 ประกอบด้วย หน้าต่างควบคุมโซลินอยด์วาล์ว (ก), หน้าต่างตั้งค่าพอร์ตเชื่อมต่อ (ข), หน้าต่างสอบเทียบค่าการนำไฟฟ้า (ค)

โปรแกรม OxyGraph V1.0 ที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากกราฟได้โดยอัตโนมัติ โดยลักษณะกราฟประกอบด้วยช่วงที่มีความชันต่ำในระยะแรกและช่วงที่มีความชันสูงหลังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันถูกกำหนดจากตำแหน่งจุดตัดของเส้นแนวโน้มทั้งสองช่วงบนแกนเวลา ข้อมูลผลการทดสอบถูกจัดเก็บในโปรแกรมเพื่อให้สามารถเรียกดูย้อนหลังได้โดยสะดวก และโปรแกรมสามารถแสดงค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โดยอัตโนมัติ ช่วยเพิ่มความสะดวกในการทำงาน ทั้งนี้โปรแกรมได้รับการพัฒนาให้ผู้ใช้สามารถกำหนดช่วงข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณความชันของกราฟทั้งสองช่วง เพื่อช่วยให้การระบุช่วงความชันมีความชัดเจนยิ่งขึ้นในกรณีที่กราฟไม่เป็นเส้นตรง โดยการกำหนดช่วงดังกล่าวไม่

เปลี่ยนหลักการคำนวณตามมาตรฐาน EN 14112 และโปรแกรมจะคำนวณค่าจุดตัดจากข้อมูลการวัดจริงโดยอัตโนมัติ ส่งผลให้ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่คำนวณได้มีความสอดคล้องตามหลักการคำนวณมาตรฐาน ผลการวัดแสดงในรูปแบบกราฟพร้อมผลการคำนวณค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในหน่วยชั่วโมง:นาที แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง

ผลการศึกษาความเที่ยงของเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซล 8 ช่อง ตรวจวัดที่พัฒนาขึ้น

เพื่อศึกษาค่าความเที่ยงของเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัดที่พัฒนาขึ้น โดยการทดสอบด้วยตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการผลิตตั้งต้นไม่ผ่านการเติมสารต้านอนุมูลอิสระ ด้วยตัวอย่างเดียวกันในเวลาเดียวกันของทั้ง 8 ช่องตรวจวัด เพื่อประเมินความเที่ยงแบบ Within-Run Precision (EURACHEM, 2025) ภายใต้สภาวะเดียวกันทุกช่องตรวจวัด ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ได้จากโปรแกรม OxyGraph V1.0 นำมาคำนวณเพื่อวิเคราะห์ความเที่ยงทางสถิติพบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันทุกช่องตรวจวัด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.09 ชั่วโมง และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.057 ชั่วโมง ส่งผลให้ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%RSD) มีค่า 1.40% แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่ง %RSD ที่ต่ำกว่า 2% แสดงว่ามีความสม่ำเสมอและความกระจายของข้อมูลต่ำ (Knothe, 2007) แสดงให้เห็นถึงความเที่ยงของ

เครื่องวัดแบบ 8 ช่องตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ระหว่างหัววัดต่าง ๆ มีประสิทธิภาพดี อัตราการไหลของอากาศมีความสม่ำเสมอทั้งระบบตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้ามีความเสถียร

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล 8 ช่องตรวจวัด

ช่องตรวจวัด	ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน $\pm$ SD (ชั่วโมง)
1	4.08 $\pm$ 0.11
2	4.03 $\pm$ 0.04
3	4.15 $\pm$ 0.17
4	4.05 $\pm$ 0.24
5	4.00 $\pm$ 0.09
6	4.08 $\pm$ 0.02
7	4.12 $\pm$ 0.02
8	4.17 $\pm$ 0.02
ค่าเฉลี่ย (ชั่วโมง)	4.09
SD (ชั่วโมง)	0.057
%RSD	1.40

ผลการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์

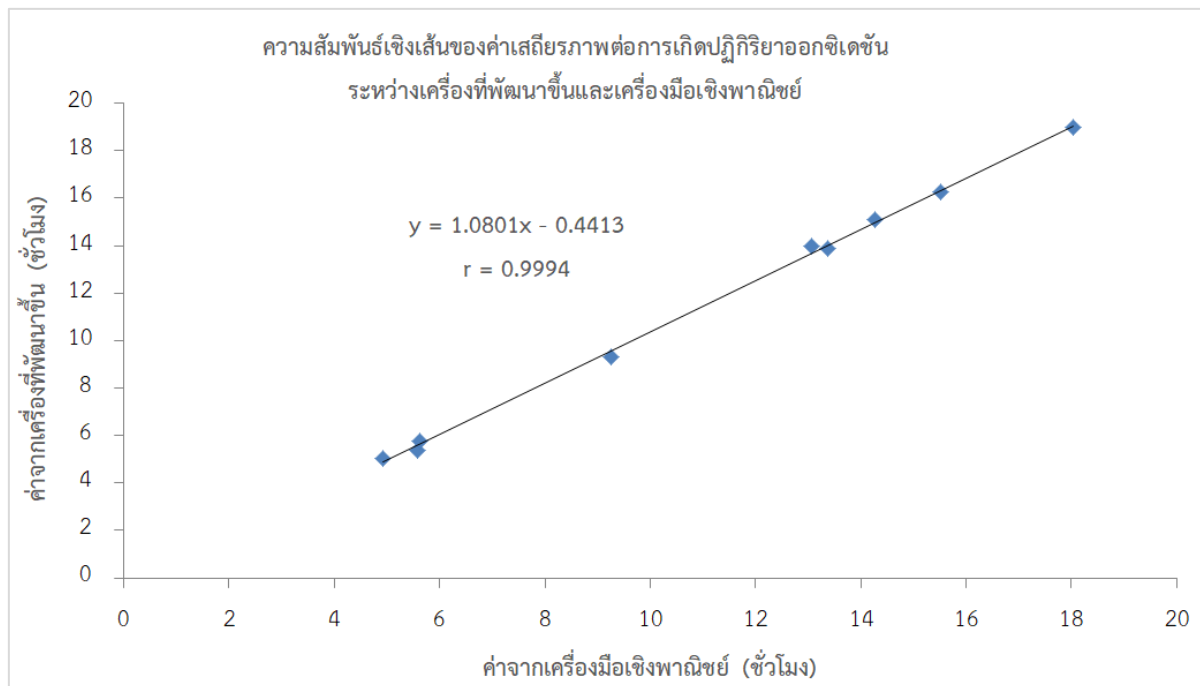
การทดสอบวัดค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อหาค่าความเที่ยงผลการทดสอบที่ได้ด้วยเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัด ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์โดยการทดสอบตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลจำนวน 9 ตัวอย่าง สำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นเพื่อประเมินความสอดคล้องของผลการวัดระหว่างเครื่องมือทั้งสอง ไม่ได้ใช้เพื่อการทำนายเชิงสถิติ จึงรายงานค่าการวัดโดยไม่แสดงค่า SD ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์

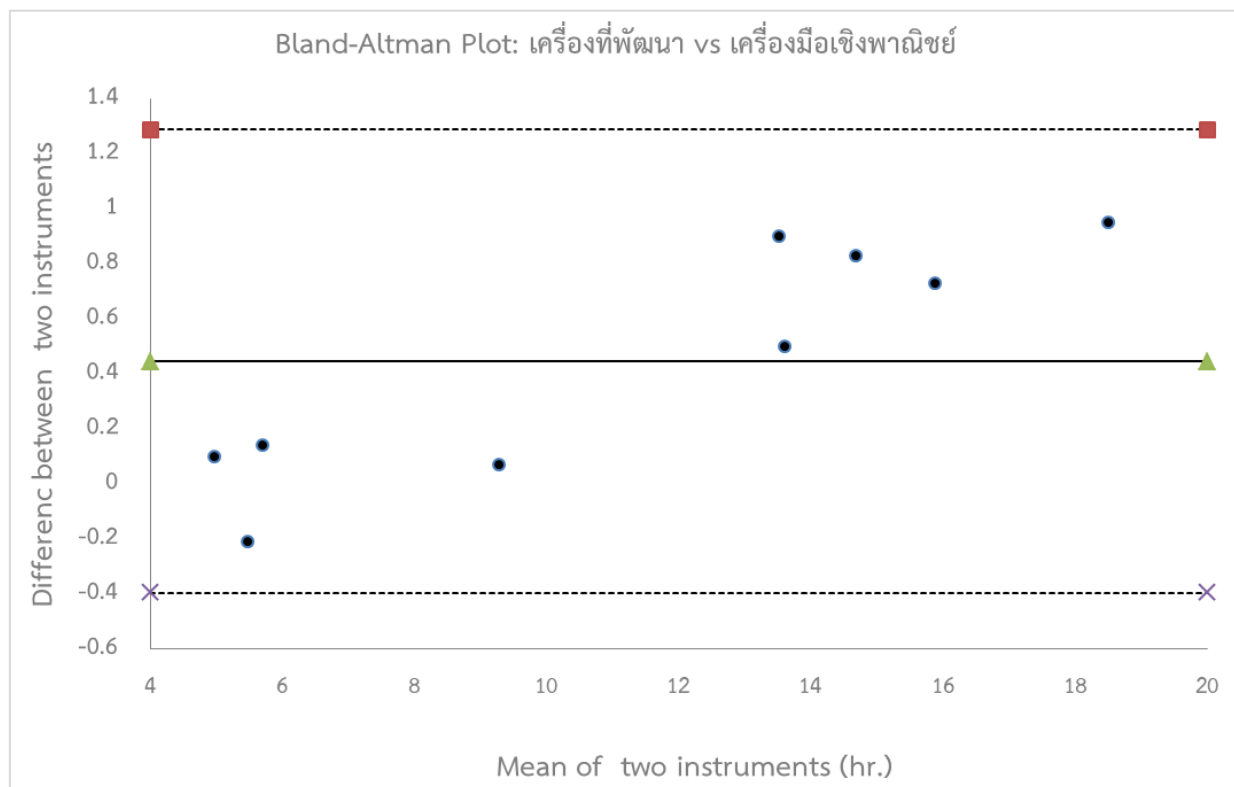
ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล (ชั่วโมง)		
ตัวอย่าง	เครื่องที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือเชิงพาณิชย์
A	5.02	4.92
B	5.37	5.58
C	5.77	5.63
D	9.32	9.25
E	13.97	13.07

ผลการทดสอบค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล (ชั่วโมง)		
ตัวอย่าง	เครื่องที่พัฒนาขึ้น	เครื่องมือเชิงพาณิชย์
F	13.87	13.37
G	15.10	14.27
H	16.25	15.52
I	18.98	18.03

จากตารางที่ 2 ตัวอย่าง A ถึง I ถูกจัดเรียงลำดับตามค่าความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากค่าต่ำไปสูงเพื่อความสะดวกในการนำเสนอ มิได้แสดงแนวโน้มเชิงเวลา ความแตกต่างของค่าที่วัดได้เกิดจากความแตกต่างของกระบวนการผลิตและการเติมสารต้านอนุมูลอิสระในสัดส่วนที่ต่างกัน ทั้งนี้ตามมาตรฐาน EN 14112 ตัวอย่างที่มีค่าต่ำกว่า 6 ชั่วโมงถือว่ายังไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 2 สร้างกราฟ Regression Line แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลการทดสอบที่วัดได้จากเครื่องที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์ เพื่อหาค่าความสัมพันธ์พิจารณาด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันโดย $r = 0.9994$ แสดงดังภาพที่ 9 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นในระดับสูงมากและมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) สะท้อนให้เห็นว่าผลการวัดจากทั้งสองวิธีมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันอย่างสอดคล้องตลอดช่วงค่าการทดสอบ การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นให้สมการ $y = 1.080x - 0.441$ โดย y แทนค่าผลการวัดจากเครื่องที่พัฒนาขึ้น x แทนค่าจากเครื่องมือเชิงพาณิชย์ เมื่อพิจารณาช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของ Slope พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1.047 ถึง 1.114 ซึ่งไม่ครอบคลุมค่าทางทฤษฎีเท่ากับ 1 ขณะที่ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของค่า Intercept อยู่ในช่วง -0.843 ถึง -0.039 ซึ่งไม่ครอบคลุมค่า 0 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างเชิงระบบระหว่างสองวิธีการวัด อย่างไรก็ตามแม้ว่าผลการวิเคราะห์ช่วงความเชื่อมั่นของ Slope และ Intercept จะแสดงความแตกต่างเชิงสถิติจากค่าทางทฤษฎี แต่ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นที่สูงมาก และลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลรอบเส้นถดถอยที่อยู่ในระดับต่ำ แสดงให้เห็นว่าเครื่องที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ผลการวัดที่มีความสอดคล้องกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์ในเชิงแนวโน้ม ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนั้นอาจเกิดจากความแตกต่างด้านระบบควบคุมอุณหภูมิของฮีตติ้งบล็อกและการควบคุมอัตราการไหลของอากาศแห้ง ในขณะเดียวกันเมื่อนำข้อมูลมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์เพื่อวิเคราะห์ความสอดคล้องเชิงระบบโดยใช้สถิติ Bland-Altman Plot (Giavarina, 2015) สำหรับเปรียบเทียบการวัดที่ได้จากทั้งสองเครื่องมือ โดยแกน y แสดงความแตกต่างระหว่างการวัดสองค่า และแกน x แสดงค่าเฉลี่ยของผลการวัดจากทั้งสองเครื่องมือ เพื่อประเมินผลการวัดจากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์มีความใกล้เคียงหรือสามารถใช้ทดแทนกันได้หรือไม่ โดยหาก Mean Difference ใกล้เคียงกับ 0 และค่าความแตกต่างส่วนใหญ่ตกอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย $\pm 1.96SD$ (Bland et al., 1999) แสดงว่าผลการวัดจากทั้งสองเครื่องมือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 10 พบว่าค่าเฉลี่ยของความแตกต่างเท่ากับ 0.44 ชั่วโมง โดยเครื่องที่พัฒนาขึ้นให้ค่ามากกว่าเครื่องเชิงพาณิชย์เล็กน้อย อาจเกิดจากความแตกต่างด้านระบบควบคุมอุณหภูมิของฮีตติ้งบล็อกและการควบคุมอัตราการไหลของอากาศแห้ง ขอบเขตความสอดคล้องขีดจำกัดต่ำสุดและขีดจำกัดสูงสุด (Limit of Agreement) อยู่ระหว่าง -0.40 ถึง 1.29 ชั่วโมง ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดอยู่ภายในช่วงที่กำหนดไว้ภายใต้ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ ค่าเฉลี่ย $\pm 1.96SD$ และไม่พบค่าผิดปกติ (Outlier) แสดงให้เห็นว่าผลการวัดที่ได้จากทั้งสองเครื่องมือมีความสอดคล้องกัน เครื่องที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสมเช่นเดียวกับเครื่องเชิงพาณิชย์ภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลการทดสอบที่วัดได้จากเครื่องที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์



ภาพที่ 10 สถิติ Bland-Altman Plot ระหว่างเครื่องที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์

อภิปรายผล

เครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัด ที่พัฒนาขึ้นซึ่งประกอบไปด้วยหลุมสำหรับให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจำนวน 8 หลุม ควบคุมอุณหภูมิด้วยดิจิทัล PID Controller มีอิเล็กทรอนิกส์การนำไฟฟ้าจำนวน 8 ช่องตรวจวัด เพื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าและแปลงค่าเป็นดิจิทัล โดยควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F252 และโปรแกรม OxyGraph V1.0 ที่พัฒนาขึ้นสามารถทดสอบตัวอย่างได้ 8 ตัวอย่างเป็นอิสระต่อกัน อีกทั้งสามารถเรียกดูข้อมูลย้อนหลังได้ทำให้สะดวกในใช้งาน และเมื่อพิจารณาความเที่ยงของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นจากผลการทดสอบค่าความเสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลชนิดเดียวกันทั้ง 8 ช่องตรวจวัด ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกันพบว่าค่าความเสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเฉลี่ยเท่ากับ 4.09 ชั่วโมง มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.057 ชั่วโมง และมีค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 1.40% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่มีความเที่ยงสูง (Latimer, 2023) แสดงให้เห็นถึงความเที่ยงของเครื่องมือแบบ 8 ช่องตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นสะท้อนถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิ อัตราการไหลของอากาศ และระบบวัดค่าการนำไฟฟ้าที่มีความเสถียรสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่ทัดเทียมหรือใกล้เคียงกับเครื่องเชิงพาณิชย์ (Metrohm, 2018) ที่กำหนดเกณฑ์ความเที่ยงอยู่ที่ $\%RSD \leq 2\%$ สำหรับงานวิเคราะห์คุณภาพไบโอดีเซลตามมาตรฐาน (European Committee for Standardization, 2020)

นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องมือเครื่องเชิงพาณิชย์พบว่าค่าที่ได้จากทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นในระดับสูงคือมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.9994 แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ผลการวัดที่มีแนวโน้มสอดคล้องกับเครื่องเชิงพาณิชย์ โดยมีค่าเชิงเส้นคือ $y = 1.080x - 0.441$ และจากการวิเคราะห์ Bland-Altman ความคลาดเคลื่อนระหว่างเครื่องมือทั้งสองอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± 1.96 SD แสดงให้เห็นว่าไม่มีแนวโน้มความคลาดเคลื่อนเชิงระบบที่มีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมีแนวโน้มสูงกว่าเครื่องเชิงพาณิชย์เล็กน้อย อาจเกิดจากความแตกต่างด้านระบบควบคุมอุณหภูมิของฮีตติ้งบล็อกและการควบคุมอัตราการไหลของอากาศแห่ง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากความเที่ยงด้วยสถิติ $\%RSD$ ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นและ Bland-Altman ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลที่พัฒนาขึ้น มีความสามารถในการวัดค่าที่มีความเที่ยงอยู่ในระดับสูงสามารถใช้ทดแทนเครื่องมือเชิงพาณิชย์ได้และมีศักยภาพเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานในห้องปฏิบัติการตรวจสอบคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลตามมาตรฐาน EN 14112

สรุปผลการวิจัย

ผลจากการพัฒนาเครื่องมือทำให้ได้เครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัด เพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มีความเที่ยงพิจารณาจากค่า $\%RSD$ เท่ากับ 1.40 จากผลการทดสอบตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลตัวอย่างเดียวกันทดสอบการหาค่าเสถียรภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันพร้อมกันทั้ง 8 ช่องตรวจวัดโดยให้ผลเฉลี่ยของค่าเสถียรภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอยู่ที่ 4.09 ชั่วโมง และจากการทดสอบค่าความเที่ยงเมื่อเทียบกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์ ผลการทดสอบเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเทียบกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์ให้รูปแบบความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้น ผลการทดสอบที่ได้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นในระดับสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.9994 แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นให้ผลการวัดที่มีแนวโน้มสอดคล้องกับเครื่องเชิงพาณิชย์ สามารถใช้ทดสอบตัวอย่างไบโอดีเซลตามมาตรฐาน EN14112 และทดแทนเครื่องมือนำเข้าจากต่างประเทศได้ นอกจากนี้เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นใช้ชิ้นส่วนที่สามารถจัดหาได้ภายในประเทศและได้รับการออกแบบให้สอดคล้องกับการใช้งานเฉพาะด้าน ส่งผลให้ต้นทุนในการพัฒนาและการบำรุงรักษาต่ำกว่าเครื่องมือเชิงพาณิชย์ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งเอื้อต่อการนำไปใช้งานจริงในหน่วยงาน

วิเคราะห์ทดสอบภายในประเทศ เครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัด มีคุณสมบัติดังนี้

ระบบให้ความร้อน	: บล็อกทำความร้อนอะลูมิเนียมแบบชิ้นเดียว
จำนวนตัวอย่างสูงสุด	: 8 ตัวอย่าง
ช่วงอุณหภูมิ	: 50 - 150 องศาเซลเซียส
การปรับแก้อุณหภูมิ	: -10.0 - +10.0 องศาเซลเซียส
แหล่งจ่ายแก๊ส	: อากาศแห้ง (Air Zero) จากถังบรรจุความดันสูง
ช่วงการวัดค่าการนำไฟฟ้า	: 0 - 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$
การเชื่อมต่อ	: RS232 / USB
พลังงาน	: AC220V 50/60Hz 500VA
ต้นทุนการผลิต	: 100,000 บาท

ข้อเสนอแนะการวิจัย

แม้ว่าปัจจุบันกระแสการใช้น้ำมันไบโอดีเซลเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซลเริ่มชะลอตัวจากการผลิตที่มากเกินไป ความต้องการอยู่บ้างแต่ในระยะยาวความต้องการใช้น้ำมันไบโอดีเซลจะมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทนที่ช่วยลดการพึ่งพาน้ำมันเชื้อเพลิงฟอสซิลและมีส่วนช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Knothe et al., 2017) และการตรวจสอบคุณภาพไบโอดีเซลยังคงเป็นสิ่งจำเป็น โดยต้องทดสอบความเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชันตามมาตรฐาน EN 14112 เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน ซึ่งไบโอดีเซลเป็นวัตถุดิบหลักในการผสมเพื่อจำหน่ายเป็นน้ำมันดีเซล B7 B10 และ B20 นอกจากนี้ น้ำมันดีเซล B7 จะต้องตรวจสอบตามมาตรฐาน EN15751 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ดัดแปลงมาจาก EN14112 ดังนั้นเครื่องวัดเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันไบโอดีเซลแบบ 8 ช่องตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถปรับใช้ให้สอดคล้องกับมาตรฐาน EN15751 ได้ ในขณะเดียวกันสามารถประยุกต์เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเพื่อลดจำนวนช่องตรวจวัดให้เหมาะสมกับปริมาณตัวอย่างเพื่อลดต้นทุนในการพัฒนาเครื่องมือขึ้นใช้เองได้เช่น 4 หรือ 2 ช่องตรวจวัด และเพื่อให้มั่นใจว่าเครื่องมือยังคงมีประสิทธิภาพตามมาตรฐาน EN14112 ควรทำการสอบเทียบหรือทวนสอบอุณหภูมิของฮีตติ้งบล็อกให้ควบคุมอุณหภูมิ 110 ± 0.1 องศาเซลเซียส หากไม่อยู่ในช่วงสามารถปรับค่าแก้อุณหภูมิที่ตัวควบคุมอุณหภูมิได้ ตลอดจนการสอบเทียบเครื่องมือวัดอื่นให้อยู่ในช่วงการยอมรับของมาตรฐาน เช่น มิเตอร์วัดการไหลของอากาศ (10 ± 1 l/h) เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ รหัสโครงการวิจัย ENG520109S ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยส่งผลให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณผู้อำนวยการสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบซึ่งเป็นที่ปรึกษาโครงการวิจัยในการให้คำปรึกษาพร้อมทั้งเอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วง สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบุคลากรสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัยในครั้งนี้

การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Generative AI) ในต้นฉบับบทความ

ผู้เขียนใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Generative AI) คือ ChatGPT เพื่อช่วยปรับปรุงข้อความ การตรวจสอบไวยากรณ์ การแปลภาษา ทั้งนี้ปัญญาประดิษฐ์ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบการวิจัย การเก็บรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การแปลผล หรือการสรุปผลการวิจัย ผู้เขียนได้ตรวจสอบความถูกต้อง ความครบถ้วน ความเหมาะสมของเนื้อหาด้วยตนเอง และเป็นผู้รับผิดชอบสูงสุดต่อเนื้อหาทั้งหมดของบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ รวมถึงความถูกต้องของรายการอ้างอิงที่ปรากฏในเอกสารอ้างอิงท้ายบทความ

คำชี้แจงบทบาทผู้นิพนธ์ (CRediT Author Statement)

ศัตยา บุญรัตนชู: การออกแบบระเบียบวิธี; การพัฒนาโปรแกรม; การตรวจสอบความถูกต้อง; การวิเคราะห์เชิงรูปแบบ; การดำเนินการวิจัย; การจัดหาทรัพยากรวิจัย; การจัดการข้อมูล; การเขียนต้นฉบับบทความ; การทบทวนต้นฉบับบทความ; การสร้างภาพประกอบ. **วราภรณ์ รัศมีพะกาย:** การออกแบบระเบียบวิธี; การตรวจสอบความถูกต้อง; การดำเนินการวิจัย. **วชิราภรณ์ ปิสิโต:** การออกแบบระเบียบวิธี; การตรวจสอบความถูกต้อง; การดำเนินการวิจัย. **ทรงสุตา พรหมทอง:** ตรวจสอบความถูกต้อง; การวิเคราะห์เชิงรูปแบบ; การดำเนินการวิจัย; การจัดการข้อมูล; การเขียนต้นฉบับบทความ; การทบทวนต้นฉบับบทความ; การสร้างภาพประกอบ.

เอกสารอ้างอิง

- กรมธุรกิจพลังงาน. (2562). *ประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2562*. สืบค้นจาก https://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2562/E/264/T_0004.PDF
- Agarwal, A. K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(3), 233-271.
- Altarazi, Y. S. M., Abu, T. A. R., Yu, J., Gires, E., Abdul, G. M. F., Lucas, J., & Yusaf, T. (2022). Effects of biofuel on engines performance and emission characteristics: A review. *Energy*, 238, 121910.
- Bland, J. M., & Altman, D. G. (1999). Measuring agreement in method comparison studies. *Statistical Methods in Medical Research*, 8(2), 135-160.
- Chassagne, C., Dubois, E., María, L. J., Ploeg, V. D. J. P. M., & Turnhout, V. J. (2016). Compensating for electrode polarization in dielectric spectroscopy studies of colloidal suspensions: Theoretical assessment of existing methods. *Frontiers in Chemistry*, 4, 30.
- EURACHEM. (2025). *The fitness for purpose of analytical methods: A laboratory guide to method validation and related topics* (3rd ed.). https://www.academia.edu/106470877/The_Fitness_for_Purpose_of_Analytical_Methods
- European Committee for Standardization. (2020). *EN 14112: Fat and oil derivatives-Fatty acid methyl esters (FAME)-Determination of oxidation stability (Accelerated oxidation test)*. Brussels: CEN.
- Flammability Testing Equipment. (2025). *Rancimat Method EN14112 biodiesel oxidation stability test machine*. <https://www.flammabilitytestingequipment.com/sale-10949611-rancimat-method-en14112-biodiesel-oxidation-stability-test-machine.html>
- Giavarina, D. (2015). Understanding Bland Altman analysis. *Biochemia Medica*, 25(2), 141-151.

- Global Scientific. (2025). *Metrohm 892 professional rancimat oxidation stability*.
<https://www.govsci.com/product-detail/Metrohm--USA/28920010/EA>
- Knothe, G., & Razon, L. F. (2017). Biodiesel fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 58, 36-59.
- Knothe, G. (2007). Some aspects of biodiesel oxidative stability. *Fuel Processing Technology*, 88(7), 669-677.
- Latimer, G. W. (2023). *Official methods of analysis of AOAC International* (22nd ed.). Maryland: AOAC International.
- Loh, S. K., Chew, S. M., & Choo, Y. M. (2006). Oxidative stability and storage behavior of fatty acid methyl esters derived from used palm oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 83(11), 947-952.
- Metrohm, A. G. (2018). *892 Professional Rancimat-Operation manual and application report*.
https://www.metrohm.com/th_th/products/2/8920/28920010.html
- Miller, J. N., Miller, J. C., & Miller, P. D. (2018). *Statistics and chemometrics for analytical chemistry* (7th ed.). London: Pearson Education.
- Mizuhata, M. (2022). Electrical conductivity measurement of electrolyte solution. *The Electrochemical Society of Japan*, 90(10), 102011.
- Sarin, A., Arora, R., Singh, N. P., Sarin, R., & Malhotra, R. K. (2010). Oxidation stability of palm methyl ester: Effect of metal contaminants and antioxidants. *Energy Fuels*, 24(4), 2652-2656.
- Texas Instruments. (2021). *Temperature sensing with NTC thermistor circuit (Design note SBOA323)*.
<https://www.ti.com/lit/pdf/sboa323>
- Yang, Z., Hollebone, B., Wang, Z., Yang, C., & Landriault, M. (2013). Factors affecting oxidation stability of commercially available biodiesel products. *Fuel Processing Technology*, 106, 366-375.