

การศึกษาความหนืดและความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนน้ำโดยใช้สารเติมแต่ง ผงนาโนกราไฟต์และน้ำมันดอกทานตะวัน

Study on Viscosity and Acid of Lubricant-Water Contamination using Nano- Graphite Powder and Sunflower Oil as Additives

พุทธา จินครวั^{1,*} อภัสรา มีพัว¹ และ สาธิต ทับทิมทอง¹

¹ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา แสนสุข เมือง ชลบุรี 20131

Puttha Jeenkour^{1,*}, Aphatsara Meephua¹ and Satris Tabtimthong¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Saensuk, Chonburi, 20131, Thailand

*Corresponding Author E-mail: puttha@eng.buu.ac.th

Received: Mar 22, 2022; Revised: May 31, 2022; Accepted: Jun 09, 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาความหนืดและระดับความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนน้ำโดยใช้สารเติมแต่ง การเพิ่มขึ้นทั้งค่าความหนืดและความเป็นกรดในน้ำมันหล่อลื่นเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลทำให้สารหล่อลื่นมีประสิทธิภาพ ที่ลดลง ดังนั้นการรักษาคุณภาพคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นจึงกลายเป็นหัวข้อหลักและมีความสำคัญ ตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผล ให้คุณสมบัติของน้ำมันเปลี่ยนแปลงคือการปนเปื้อนจากน้ำ ดังนั้นบทความนี้จึงทำการศึกษาคูสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ ปนเปื้อนน้ำร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนักและเติมสารเติมแต่งร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก สำหรับสารเติมแต่งที่ใช้ได้แก่ผงนาโนกราไฟต์และน้ำมันดอกทานตะวัน โดยตัวอย่างสารหล่อลื่นที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะทำการวัดค่าความหนืดสารหล่อลื่นโดยใช้ เครื่องวัดค่าความหนืดไดนามิก ระดับค่าความเป็นกรดวัดโดยใช้ชุดทดสอบค่า PH แบบดิจิทัลและใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อ ขยายภาพลักษณะทางกายภาพการผสมของสารหล่อลื่นที่ศึกษา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้ผงนาโนกราไฟต์ลงใน น้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนน้ำสามารถที่จะคงสภาพความหนืดและค่าความเป็นกรด-ด่างได้ดีกว่าการใช้น้ำมันดอกทานตะวัน เป็นสารเติมแต่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับน้ำมันพื้นฐานที่ไม่มีการปนเปื้อนน้ำ ดังนั้นการใช้ผงนาโน-กราไฟต์มีแนวโน้มที่ ดีสำหรับการใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อป้องกันผลกระทบจากการปนเปื้อนน้ำ

คำสำคัญ: การหล่อลื่น, ปฏิกิริยาออกซิเดชัน, นาโนกราไฟต์, น้ำมันดอกทานตะวัน, ความหนืด, ปริมาณความเป็นกรด-ด่าง

Abstract

This paper studies the viscosities and acid levels of the lubricant-water contamination by using the additives. The increase in both the viscosity and acid in lubricating oil are significant factors contributing to the reduced efficiency of oil. Therefore, maintaining the oil properties has become the main issue and importance. The serious parameter that affects the oil properties is water contamination. Therefore, this article examines the oil properties that are contaminated with 1-5 % water by weight and added 1-5% additives by weight. The additives used include nano graphite powder and sunflower oil. The viscosities of the lubricant samples at different temperatures are measured using a dynamic viscometer. The acid levels

are measured using a digital PH test kit, and the microscope enlarges the physical characteristics of the mixtures of the studied lubricants. The results show that adding the nano-graphite powder to a base oil with water contamination can maintain the viscosity and PH level better than the sunflower oil as an additive compared to a base oil without water contamination. Therefore, the use of nano-graphite powders is promising for use as an additive to prevent the effects of water contamination.

Keywords: Lubrication, oxidation reaction, nano-graphite, sunflower oil, viscosity, acid-base

1. บทนำ

สารหล่อลื่นถูกใช้อย่างแพร่หลายเพื่อช่วยชีวิตอายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่มีการสัมผัสกันเช่น เจอร์นอลแบร์ริง (Journal bearing) แบร์ริงกันรุน (Thrust bearing) ฟันเฟือง (gear) เป็นต้น ดังนั้นการตรวจสอบคุณสมบัติของสารหล่อลื่นจึงมีความสำคัญเนื่องจากสารหล่อลื่นที่เสื่อมคุณภาพจะทำให้ชิ้นส่วนทางกลเกิดการสึกหรอและแตกหักเป็นเหตุให้เครื่องจักรจะต้องหยุดทำงานและเสียเวลาในการเปลี่ยนชิ้นส่วนทำให้เสียโอกาสในการดำเนินการผลิตและต้นทุนสูงขึ้น หนึ่งในสาเหตุที่ทำให้สารหล่อลื่นเสื่อมคุณภาพก่อนเวลาอันควรคือความชื้นหรือการปนเปื้อนของน้ำลงในสารหล่อลื่นซึ่งนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้ความหนืดสูงขึ้น สารภาพของสารหล่อลื่นมีความเป็นกรด ทำให้ชิ้นส่วนทางกลที่สัมผัสกันมีแรงเสียดทานสูงขึ้น เกิดความร้อนไม่เหมาะสมที่จะใช้งานอีกต่อไป จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดที่เพิ่มขึ้นและความเป็นกรดของน้ำมันกับปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งสามารถที่จะสรุปได้ดังนี้ A. Y. El-Naggar และคณะ [1] ได้ศึกษาความเสถียรภาพของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานหลังจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน 50-150 ชั่วโมง โดยอัตราการเกิดออกซิเดชันถูกระบุโดยการเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดและค่า TAN (total acid number) ซึ่งเป็นค่าที่วัดความเป็นกรดที่กำหนดโดยปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) ในหน่วยมิลลิกรัมที่ใช้เพื่อทำให้สภาพความเป็นกรดเป็นกลางสำหรับน้ำมันหนึ่งกรัม C.Georgescu และคณะ [2] ได้อธิบายข้อดีของการใช้น้ำมันจากพืชคือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยได้เปรียบเทียบน้ำมันถั่วเหลืองก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันพบว่าค่าความหนืดสูงขึ้น

สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นโดยการให้ความร้อนและปล่อยให้อากาศเข้าสัมผัสกับน้ำมัน J.K. Mannekote และ S. V. Kailas [3] ได้ศึกษาผลของปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อประสิทธิภาพทางไตรโบโลยี (Tribology) ของน้ำมันหล่อลื่นจากพืชเช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันจากข้าว น้ำมันจากถั่วเป็นต้น โดยทำการให้ความร้อน 60°C เพื่อเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันจากนั้นเก็บน้ำมันไว้ 14-48 วัน และทำการวัดค่าความหนืดและปริมาณกรดไขมันเทียบกับกรณีน้ำมันใหม่พบว่าน้ำมันพืชทุกตัวมีความหนืดสูงขึ้นและมีปริมาณกรดไขมันที่สูงขึ้นหลังจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สำหรับสารเติมแต่งที่มีคุณสมบัติต้านการเกิดออกซิเดชันนั้นได้ถูกอธิบายโดย N. Canter [4] โดยสารต้านการเกิดออกซิเดชันจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอนุมูลอิสระ (free radicals) เพื่อทำให้เกิดการเสถียรและขัดขวางวงจรการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

วิธีหนึ่งที่จะชะลอหรือรักษาคุณสมบัติของสารหล่อลื่นคือการเติมสารเติมแต่งลงไปในสารหล่อลื่นพื้นฐานสำหรับบทความวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสารเติมแต่งในสารหล่อลื่นสามารถสรุปได้ดังนี้ น้ำมันดอกทานตะวันและน้ำมันจากถั่วถูกใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อวัตถุประสงค์สำหรับการเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [5] ถูกผสมลงในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (base oil) โดยผ่านกระบวนการ copolymerization งานวิจัยได้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นและแสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำมันดอกทานตะวันและน้ำมันจากถั่วส่งผลให้ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นและยังมียานวิจัยอีกจำนวนหนึ่งที่ได้ศึกษาการปรับปรุงน้ำมันจากพืช (vegetable oils) เป็นสารเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่น [6-8] สำหรับในกรณีที่ใช้สารเติมแต่งที่เป็นอนุภาคสามารถสรุปได้ดังนี้ สารเติมแต่ง

ชนิดอนุภาคนาโนโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (molybdenum-disulphide, MoS₂) และ อนุภาคนาโนซิงค์-ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ได้ศึกษาเชิงเปรียบเทียบถึงคุณสมบัติการเป็นสารเติมแต่งที่ใช้สำหรับการหล่อลื่น โดยทำการทดสอบคุณสมบัติทางไตรโบโลยี (Tribology) ด้วยวิธี pin-on-disc [9] เพื่อหาการต้านทานการสึกหรอและแรงเสียดทาน เมื่อเติมอนุภาคนาโนทำให้ความหนืดของสารหล่อลื่นเพิ่มขึ้นและลดการสึกหรอ สำหรับการใช้อนุภาคนาโนชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO₂) อนุภาคนาโนไดมอนด์ (nanodiamond) และไทเทเนียมคาร์ไบด์ (Titanium Carbide, Ti₃C₂) เป็นสารเติมแต่งได้ถูกศึกษา [10–13] และการใช้สารเติมแต่งที่สกัดจากธรรมชาติเป็นอนุภาคนาโนเซลลูโลส (cellulose nanoparticles) [14] แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในช่วงการหล่อลื่นแบบผสม (mixed lubrication) จะลดลงเมื่อเติมอนุภาคนาโนในเซลลูโลสโดยร้อยละการเติมอยู่ที่ 3.3%wt จะส่งผลดีที่สุด จากข้อมูลการทดลอง 0.5%wt ถึง 6.0%wt ในทำนองเดียวกันอนุภาคนาโนกราฟต์ก็ถูกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่น [15–18] ซึ่งรายงานว่ามีประสิทธิภาพในปริมาณที่เหมาะสมสามารถที่จะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและเมื่อทดสอบการสึกหรอพบว่าได้ผลที่ดีขึ้น ดังนั้นอนุภาคนาโนกราฟต์ยังคงอยู่ในความสนใจและประยุกต์ใช้ในงานทางด้านการหล่อลื่น [19] อย่างไรก็ตามยังมีบางประเด็นที่ควรศึกษาเพิ่มเติมเช่นผลต่อการรักษาสภาพของน้ำมันเมื่อเกิดการปนเปื้อนน้ำเป็นต้น

จากการวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นการศึกษาสารเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่นยังคงมีความน่าสนใจ ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้อนุภาคนาโนกราฟต์ซึ่งมีผลดีช่วยลดแรงเสียดทานและน้ำมันดอกทานตะวันซึ่งเป็นสารที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยวิเคราะห์ค่าความหนืดสารหล่อลื่นและค่าความเป็นกรดซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกสภาพของน้ำมันหล่อลื่น โดยในบทความนี้ได้ทำให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพโดยใช้ความร้อนและการปนเปื้อนน้ำเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและได้ปล่อยน้ำมันตัวอย่างไว้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยค่าคุณสมบัติของน้ำมันตัวอย่างจะทดสอบเทียบกับน้ำมันพื้นฐานที่ไม่ผ่านการใช้ (Fresh base oil) เป็นตัวแทนของสภาพน้ำมันที่มีคุณภาพที่ดี

2. วัสดุอุปกรณ์และทฤษฎี

ตารางที่ 1–3 แสดงค่าคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานข้อมูลจากผู้ผลิต[20] สารเติมแต่งน้ำมันดอกทานตะวัน [21–23] และสารเติมแต่งผงนาโนกราฟต์ข้อมูลจากผู้ผลิต [24] น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base Oil, BO) ที่ใช้ในงานบทความนี้เป็นประเภทจาระบีเหลว (MOBILUX EP0 Grease) ซึ่งเป็นเกรดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนทางกลที่รับภาระสูงในเครื่องจักรอุตสาหกรรม โดยช่วงอุณหภูมิที่ทำงานผู้ผลิตแนะนำอยู่ที่ -20°C ถึง 130°C หรืออาจจะสูงกว่านี้ได้ถ้าความถี่ในการเปลี่ยนถ่ายสารหล่อลื่นมากขึ้น ที่อุณหภูมิ 40°C และที่ความดันบรรยากาศค่าความหนืดคิเนมาติกส์ (kinematic viscosity) มีค่าเท่ากับ 160 mm²/s หรือมีค่า 0.16 Pa.s ในหน่วยของความหนืดไดนามิกและมีค่าความหนาแน่น (density) ที่อุณหภูมิ 15°C เท่ากับ 917 kg/m³ มีจุดวาบไฟ (flash point) มากกว่า 204°C และจุดเดือดมากกว่า 316°C ซึ่งอยู่สูงกว่าอุณหภูมิที่ทดลองในงานบทความนี้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำมันพื้นฐานจาระบี (MOBILUX EP0 Grease)

รายการ	ค่า
ช่วงอุณหภูมิการหล่อลื่น [°C]	-20–130
ความหนืดไดนามิกที่อุณหภูมิ 40°C [Pa.s]	0.16
ความหนาแน่นอุณหภูมิ 15°C [kg/m ³]	917
อุณหภูมิจุดเดือด [°C]	>316
ระยะจมน้ำมันในเนื้อจาระบีที่ 25°C [หน่วยวัดมาตรฐาน ASTM D217]	370
อุณหภูมิจุดวาบไฟ [°C]	>204

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของน้ำมันดอกทานตะวัน

รายการ	ค่า
ความหนืดไดนามิกที่อุณหภูมิ 40°C [Pa.s]	0.035
ความหนาแน่นอุณหภูมิ 40°C [kg/m ³]	900
อุณหภูมิจุดเกิดควัน [°C] [22]	232
อุณหภูมิจุดวาบไฟ [°C] [23]	>350

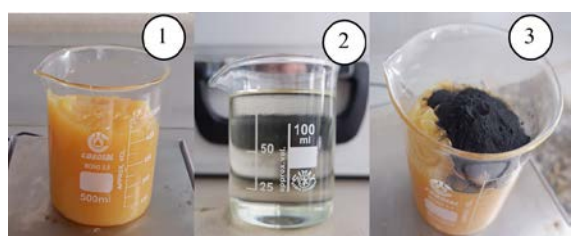
ตารางที่ 3 คุณสมบัติของผงนาโนกราฟไฟต์

รายการ	ค่า
ความหนาแน่น [kg/m^3]	2,260
อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting point) [$^{\circ}\text{C}$]	3,550
มอดูลัสของยัง [GPa]	21
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน [$\mu\text{m/m-K}$]	4.9
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค [nm]	50

สารเติมแต่งที่เติมลงในสารหล่อลื่นพื้นฐานในบทความนี้มีสองประเภทได้แก่ น้ำมันดอกทานตะวันซึ่งเป็นของเหลวและอนุภาคนาโนกราฟไฟต์ซึ่งเป็นส่วนของแข็ง น้ำมันดอกทานตะวันมีค่าความหนืดไดนามิก (dynamic viscosity) ที่อุณหภูมิ 40°C เท่ากับ 0.035 Pa.s มีค่าความหนาแน่น (density) เท่ากับ 0.919 g/cm^3 และมีอุณหภูมิจุดเกิดควัน (smoke point) เท่ากับ 232°C

สำหรับผงนาโนกราฟไฟต์ที่ใช้ในบทความนี้มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยจากข้อมูลผู้ผลิตประมาณ 50 nm มีความหนาแน่น (density) เท่ากับ $2,260 \text{ kg/m}^3$ มีอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting point) เท่ากับ $3,550^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นขณะที่ทดสอบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็นด้วยตาของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน สารเติมแต่งน้ำมันดอกทานตะวัน และผงนาโนกราฟไฟต์แสดงตามรูปที่ 1

สำหรับการผสมน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานกับสารเติมแต่งจะผ่านกระบวนการให้ความร้อน โดยใช้เครื่องกวน



รูปที่ 1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและสารเติมแต่ง: หมายเลข

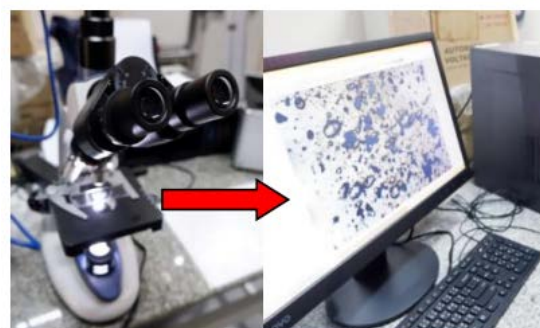
(1) จานบีเหลว หมายเลข (2) น้ำมันดอกทานตะวันและหมายเลข (3) ผงนาโนกราฟไฟต์

ผสมสารเคมีชนิดให้ความร้อน (Hot plate magnetic stirrer) ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที ตามที่แสดงหมายเลข 1 ในรูปที่ 2 และใช้เครื่องวัดความหนืดรุ่น viscometer: Serie RI:2:M ในการหาค่าความหนืดของสารหล่อลื่นจากนั้นใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรดด้วยเครื่องวัดค่า PH แบบดิจิตอลแบบพกพา ยี่ห้อ Portable PH Tester รุ่น TDS ตามที่แสดงด้วยหมายเลข 2 และ 3 ในรูปที่ 2



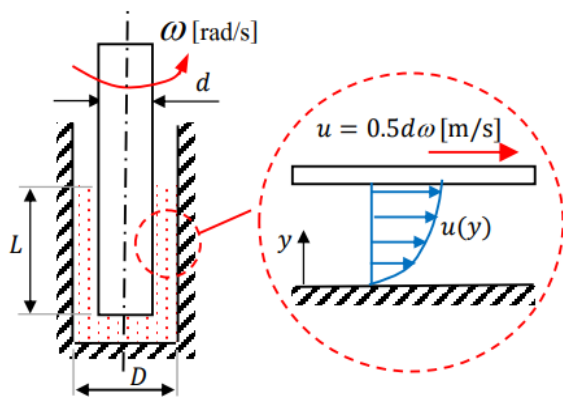
รูปที่ 2 เครื่องผสมสาร วัดความหนืดและค่า PH

เพื่อที่จะสังเกตเห็นลักษณะทางกายภาพหลังจากผสมสารเติมแต่งและการปนเปื้อนของน้ำในน้ำมันหล่อลื่น ดังนั้นจึงใช้กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ NUV TECH, Rockville, MD, USA ตามที่แสดงในรูปที่ 3 ด้านซ้าย กล้องจุลทรรศน์จะช่วยขยายภาพตัวอย่างหยดสารหล่อลื่นที่แผ่นกระจกทำให้เห็นลักษณะการผสมได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยภาพที่ถ่ายได้จากกล้องจุลทรรศน์จะถูกถ่ายโอนข้อมูลเป็นไฟล์รูปภาพส่งไปยังคอมพิวเตอร์ดังที่แสดงในรูปที่ 3 ด้านขวามือ



รูปที่ 3 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์

สำหรับการวัดค่าความหนืดของสารหล่อลื่นนั้นอาศัยหลักการทางด้านรีโอโลยี (Rheology) [25] ซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน (shear stress) ของของไหลกับอัตราความเครียดเฉือน (shear strain rate) โดยค่าความชันของกราฟจะเป็นค่าความหนืดของของไหล **รูปที่ 4** แสดงแผนภาพหลักการการวัดความหนืดด้วยวิธีการหมุนของแท่งทรงกระบอก (spindle cylinder) ของเครื่องวัดความหนืดชนิดหมุน (rotational viscometer)



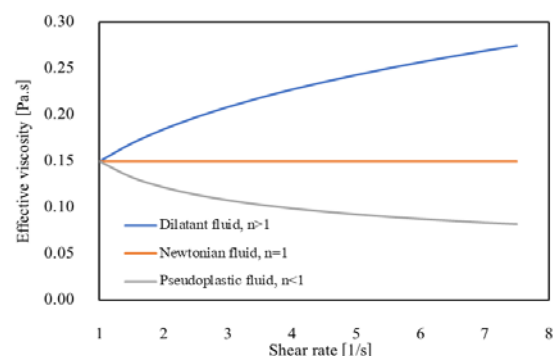
รูปที่ 4 การวัดความหนืดชนิดหมุน

สำหรับแท่งหมุนนั้นมีหลายชนิด ความเหมาะสมของการใช้งานขึ้นอยู่กับประเภทของของไหลเช่น แท่งหมุนแบบทรงกระบอก (cylinder) แผ่นจาน (disc) และ กรวย (cone) เป็นต้น ในการทดสอบแท่งหมุนจะหมุนด้วยความเร็วรอบเชิงมุม ω rad/s ตามที่ได้กำหนดค่าไว้ แรงบิดหรือทอร์ก T N.m (torque) จากแท่งจะกระทำกับผิวของไหลด้วยแรงเฉือน $\tau = T \cdot d/2$ ซึ่งทำให้ได้ค่าความเค้นเฉือน $\tau = \tau/A$ โดยที่ $A = \pi dL$ คือพื้นที่ผิวของแท่งหมุนสัมผัสกับของไหล ด้วยแรงเฉือนทำให้ของไหลเกิดการเสียรูปและเกิดการไหลด้วยรูปร่างความเร็ว (velocity profile) $u(y)$ ดังนั้นอัตราความเครียดเฉือน $\dot{\gamma}$ จะมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเทียบกับระยะตามแกน y หรือ du/dy ในกรณีของไหลที่มีพฤติกรรมเป็นนอนนิวโทเนียน (Non-Newtonian fluid) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนจะไม่เป็นเชิงเส้น ในที่นี้สามารถที่จะเขียนความสัมพันธ์โดยใช้โมเดลกฎเพาเวอร์ (Power-law model) ตามที่แสดงในสมการที่ (1) และ (2) [26]

$$\tau = \eta_e \dot{\gamma} \quad (1)$$

$$\eta_e = \eta \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

โดยที่ η_e เป็นค่าความหนืดยังผล (effective viscosity) ซึ่งสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือน τ และอัตราความเครียดเฉือน $\dot{\gamma}$ จากข้อมูลผลการทดลองสำหรับตัวแปร n และ η เป็นค่าดัชนีกฎเพาเวอร์ (power-law index) และความหนืดยังผลที่ $\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับซึ่งสามารถที่จะคำนวณหาได้จากการประมาณค่าด้วยฟังก์ชันของสมการเลขยกกำลัง (power function) จากข้อมูลระหว่าง η_e และ $\dot{\gamma}$ พฤติกรรมของของไหลนั้นสามารถที่จะจำแนกได้โดยค่า n โดยที่ค่า $n = 1$ ค่าความหนืดไม่เปลี่ยนแปลงจะเป็นของไหลชนิดนิวโทเนียน (Newtonian fluid) ในกรณีที่ $n > 1$ ความหนืดจะเพิ่มขึ้นตาม $\dot{\gamma}$ ของไหลจะเป็นชนิดนอนนิวโทเนียนแบบไดลาแทนต์ (non-Newtonian, dilatant fluid) และถ้า $n < 1$ ความหนืดจะลดลงตาม $\dot{\gamma}$ ที่เพิ่มขึ้น ของไหลที่มีพฤติกรรมในลักษณะนี้จะเป็นของไหลชนิดนอนนิวโทเนียนแบบซูโดพลาสติก (non-Newtonian, pseudoplastic fluid) **รูปที่ 5** แสดงตัวอย่างประเภทของของไหลที่ได้จากสมการที่ (2) โดยสุ่มค่า $\eta = 0.15$ และ $\dot{\gamma} = 1$ ถึง 7.5 s^{-1}

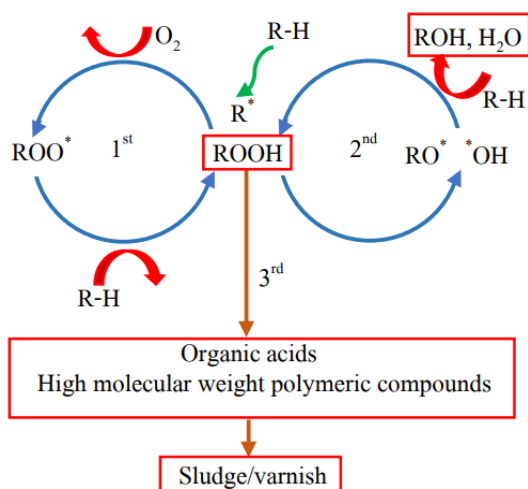


รูปที่ 5 ประเภทของของไหลตามค่าความหนืด

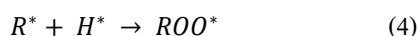
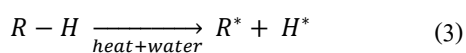
กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นทำให้เกิดสารประกอบที่เป็นกรดและสารประกอบพอลิเมอร์โมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดตะกอนเหนียว (sludge and varnish) **รูปที่ 6** แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับ ได้แก่ ขั้นตอนเริ่มต้น

(initiation stage) แสดงใน loop 1st ขั้นตอนลูกกลมหรือแพร่กระจาย (propagation) แสดงใน loop 2nd และขั้นตอนสิ้นสุด (termination) แสดงลูกศร 3rd [27]

ขั้นตอนเริ่มต้น น้ำมันหล่อลื่นเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) ที่มีอะตอมของคาร์บอน 20–70 อะตอมอยู่ในรูปแบบ $R-H$ เมื่ออยู่ภายใต้การให้ความร้อนซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้พันธะระหว่าง $R-H$ แตกออกได้เป็นอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอน R^* (hydrocarbon free radicals) ตามที่ได้แสดงในสมการที่ (3) อนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอน R^* ไม่เสถียรเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจน O_2 ได้อนุมูลเปอร์ออกไซด์ ROO^* (peroxide radicals) แสดงในสมการที่ (4) จากนั้นอนุมูลเปอร์ออกไซด์ ROO^* เข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอน $R-H$ ของน้ำมันหล่อลื่นได้สารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ $ROOH$ (hydroperoxides) และอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอน R^* ตามที่ได้แสดงในสมการ (5)



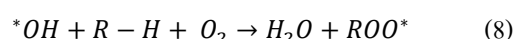
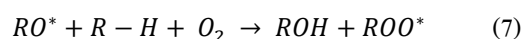
รูปที่ 6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน



ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนแพร่กระจายหรือลูกกลมสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ $ROOH$ จากสมการที่ (5) จะแตกออกได้อนุมูล RO^* และ *OH แสดงในสมการที่ (6)



จากนั้นอนุมูล RO^* เข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบ $R-H$ และโมเลกุล O_2 ได้สารประกอบประเภทแอลกอฮอล์ (alcohols) แอลดีไฮด์ (aldehyde) และ คีโตน (ketone) ในรูปแบบ ROH ที่มีสภาพเป็นกรดแสดงในสมการที่ (7) ส่วนอนุมูล *OH จากสมการที่ (6) จะเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบ $R-H$ และโมเลกุล O_2 ได้ H_2O และอนุมูล ROO^* แสดงในสมการที่ (8) อนุมูลเปอร์ออกไซด์ ROO^* ตามที่ได้แสดงในสมการที่ (7) และ (8) เข้าทำปฏิกิริยาตามขั้นตอนที่ 1 อีกครั้งตามสมการที่ (5) ก็จะเกิดการสะสมสารประกอบ $ROOH$ และได้อนุมูลอิสระ R^* เข้าทำปฏิกิริยาตามขั้นตอนที่ 1 อีกครั้ง ดังนั้นในขั้นตอนที่ 1 และ 2 จะเกิดซ้ำและเกิดปริมาณสะสมของสารประกอบ $ROOH$ และ ROH มากขึ้น



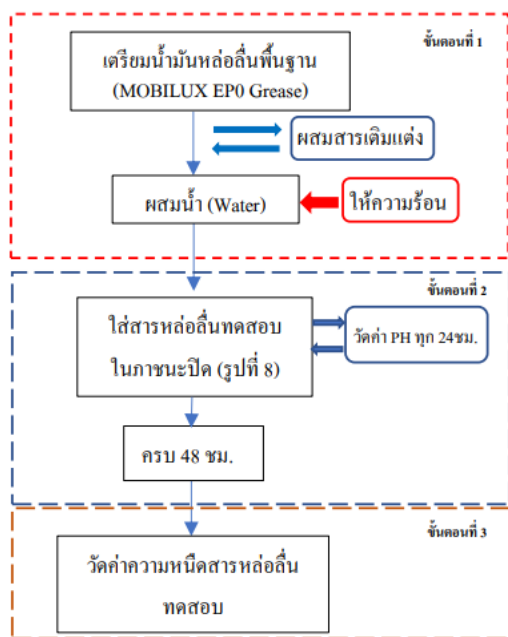
ขั้นตอนที่ 3 จากสารประกอบ $ROOH$ จะได้สารประกอบประเภทแอลกอฮอล์ (alcohols) แอลดีไฮด์ (aldehyde) และ คีโตน (ketone) ในรูปแบบ ROH และน้ำ H_2O เพิ่มขึ้นทำให้เกิดสารประกอบที่เป็นกรดอินทรีย์ (organic acids) และ พอลิเมอร์มวลโมเลกุลสูง ความหนืดของสารหล่อลื่นจะสูงขึ้น ในขั้นตอนนี้สารหล่อลื่นจะเสื่อมคุณภาพจนไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป ดังนั้นตามขั้นตอนดังกล่าวทำให้น้ำมันหล่อลื่นหลังจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมีสภาพที่มีความหนืดสูงขึ้นและมีความเป็นกรดที่สูงขึ้น

3. วิธีการศึกษา

ผลของการปนเปื้อนของน้ำลงในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและผลของการเติมสารเติมแต่งศึกษาโดยการทดสอบคุณสมบัติของของไหลโดยการวัดค่าความหนืดและค่าความเป็นกรด สำหรับการศึกษาผลการปนเปื้อนของน้ำในน้ำมันพื้นฐานจะทำการศึกษาสัดส่วนการปนเปื้อนที่ 1% wt, 3%wt และ 5%wt ตามลำดับและทำการทดสอบที่อุณหภูมิ $T = 35^\circ\text{C} - 150^\circ\text{C}$

สำหรับการศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งประเภทน้ำมันดอกทานตะวันและผงนาโนกราฟิต์จะเลือกกรณีที่น้ำมันพื้นฐานมีการปนเปื้อนด้วยน้ำ 5%wt ภายใต้สมมติฐานที่ว่า การปนเปื้อนด้วยน้ำที่มากจะเป็นตัวเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมากขึ้น ในการศึกษาการเติมสารเติมแต่งทั้งสองชนิดจะทำการศึกษาที่อัตราส่วน 1% wt, 3%wt และ 5%wt ตามลำดับ และศึกษาในขณะที่อุณหภูมิสารหล่อลื่นเท่ากับ 150°C สำหรับขั้นตอนในการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมสารหล่อลื่นทดสอบ ขั้นตอนที่ 2 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและ ขั้นตอนที่ 3 การวัดค่าคุณสมบัติสารหล่อลื่น ดังที่แสดงด้วยแผนภาพในรูปที่ 7

รูปที่ 8 แสดงสารหล่อลื่นทดสอบปนเปื้อนน้ำ 5%wt และผสมผงนาโนกราฟิต์ 1% wt, 3%wt และ 5%wt ตามลำดับในขั้นตอนที่ 2 โดยที่ภาชนะจะเป็นระบบปิดที่ปิดโดยแผ่นพลาสติกใสและกันเป็นห้อง 3 ห้อง



รูปที่ 7 ขั้นตอนการศึกษา



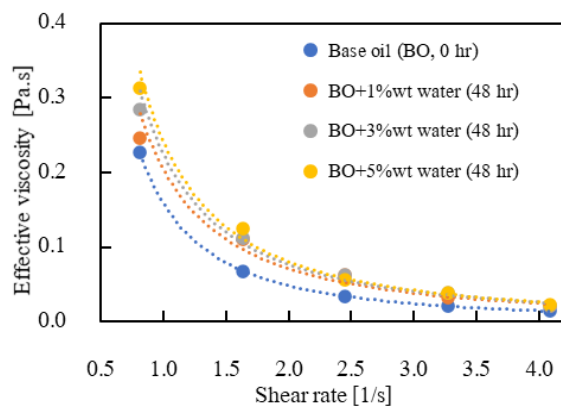
รูปที่ 8 ภาชนะปิดสำหรับน้ำมันผสมสารเติมแต่ง

4. ผลการศึกษา

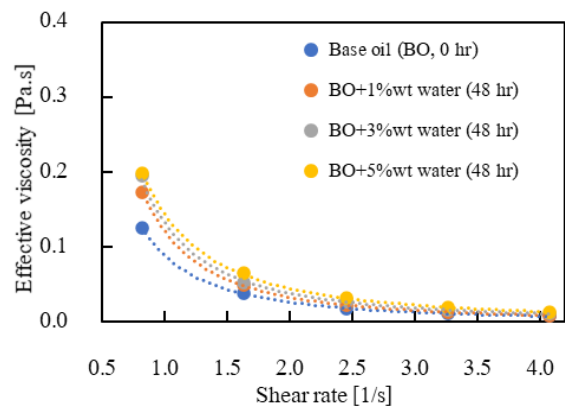
สำหรับผลการศึกษาจะแสดงค่าความหนืด ค่าความเป็นกรด และภาพจากกล้องจุลทรรศน์ตามที่ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อวิธีการศึกษา สำหรับความหนืดในกรณีที่น้ำมันพื้นฐานปนเปื้อนน้ำแสดงในรูปที่ 9 โดยสัญลักษณ์ BO แทนน้ำมันพื้นฐานซึ่งเป็นน้ำมันใหม่ (Fresh base oil) ที่ไม่ผ่านการใช้เป็นตัวแทนน้ำมันที่ไม่เสื่อมคุณภาพทำการทดสอบทันที ไม่ปล่อยทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนน้ำมันพื้นฐานที่ปนเปื้อนน้ำจะใช้สัญลักษณ์ BO + %wt ทำการทดสอบโดยผสมน้ำ 1% wt, 3%wt และ 5%wt โดยทดสอบหลังจากทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง โดยที่รูปที่ 9 (ก)-(ค) วัดความหนืดที่อุณหภูมิ 35°C, 80°C, และ 150°C ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทุกกรณีพฤติกรรมของสารหล่อลื่นที่ทดสอบมีพฤติกรรมแบบนอนนิวโทเนียนและเป็นแบบซูโดพลาสติกที่มีค่าดัชนีกฎเพอร์เวอร์ $n < 1$ ในขณะที่ยังคงผลมีค่าลดลงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น เมื่อทำการพิจารณาผลของการปนเปื้อนของน้ำพบว่าในทุกอุณหภูมิที่ศึกษาได้ผลไปในทิศทางเดียวกันคือการปนเปื้อนของน้ำในน้ำมันพื้นฐานส่งผลให้มีความหนืดสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของความหนืดเมื่อน้ำมันปนเปื้อนน้ำนั้นเกิดขึ้นได้เนื่องจากสาเหตุดังนี้ ประการแรกเนื่องจากน้ำมันกับน้ำไม่สามารถที่จะผสมเป็นเนื้อเดียวได้เมื่อทำการกวนหรือปั่นของผสมจะมีลักษณะเป็นอิมัลชัน (Emulsion) หรือคอลลอยด์ สำหรับบทความนี้น้ำจะแตกตัวเป็นเม็ดหรือหยดอนุภาคคอลลอยด์ (dispersed phase) และน้ำมันเป็นส่วนเนื้อเดียว (continuous phase) จากงานวิจัยหลายบทความที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับปริมาณน้ำในน้ำมันดิบ [28–30] ได้สรุปว่าการเกิดเม็ดหรือหยดของน้ำส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนืดอย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของความหนืดจะมีความชัดเจนเมื่อมีสัดส่วนของน้ำอยู่ประมาณ 20% โดยเฉพาะงานของ S.Daria และคณะ [30] แสดงให้เห็นว่าการมีน้ำในน้ำมันดิบในสัดส่วน 1–10% ที่อุณหภูมิ 30°C ความหนืดแตกต่างจากกรณีไม่มีน้ำปนเล็กน้อย อีกประการหนึ่งความหนืดยังเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันตามที่ได้อธิบายในสมการที่ (3)–(8) และจากทบทวนวรรณกรรม [1–3] เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นกระบวนการที่อาศัยเวลา ดังนั้นความหนืดเริ่มต้นของน้ำมันพื้นฐาน (BO, 0 hr)

ความหนืดเริ่มต้นหลังจากผสมน้ำลงในน้ำมันพื้นฐาน (BO+5%wt water, 0 hr) และความหนืดสุดท้ายหลังจากปล่อยทิ้งไว้ (BO+5%wt water, 48 hr) จึงนำมาเปรียบเทียบกับกันตามที่แสดงในรูปที่ 9(ง) จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความหนืดที่เวลาเริ่มต้นหลังจากผสมน้ำ 5%wt เนื่องจากผลของหยดน้ำ (dispersed phase) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเทียบกับกรณีความหนืดเริ่มต้นของน้ำมันพื้นฐานที่ไม่มีน้ำปนเปื้อน เนื่องจากปริมาณของน้ำที่ปนเปื้อนมีน้อยซึ่งสอดคล้องกับงานของ S.Daria และคณะ[30] ดังนั้นความหนืดที่เวลาสุดท้าย (48 hr) ของน้ำมันปนเปื้อนน้ำ 5%wt เพิ่มขึ้นจากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

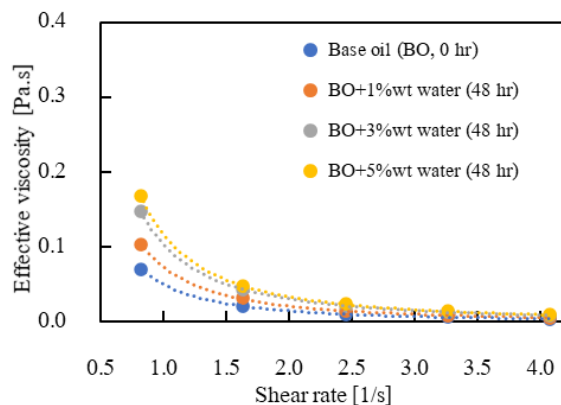
รูปที่ 10 เป็นการเปรียบเทียบกรณีที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสำหรับน้ำมันพื้นฐานปนเปื้อนน้ำ 5%wt เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเมื่อใช้งานจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น



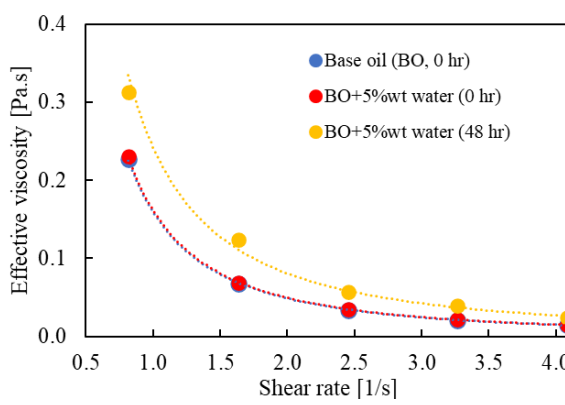
(ก)



(ข)



(ค)

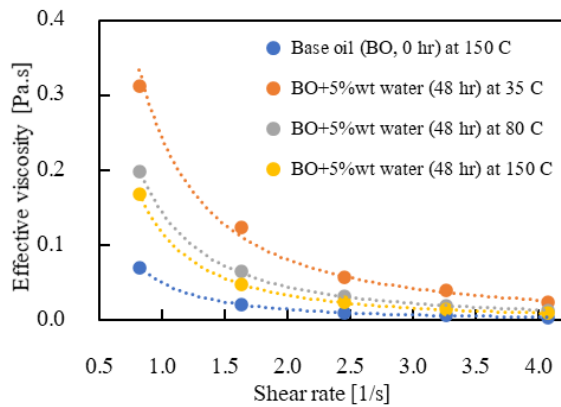


(ง)

รูปที่ 9 ความหนืดน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานปนเปื้อนน้ำ: (ก) $T=35^{\circ}\text{C}$, (ข) $T=80^{\circ}\text{C}$, (ค) $T=150^{\circ}\text{C}$ และ (ง) ความหนืดเริ่มต้นและเวลาสุดท้ายที่ $T=35^{\circ}$

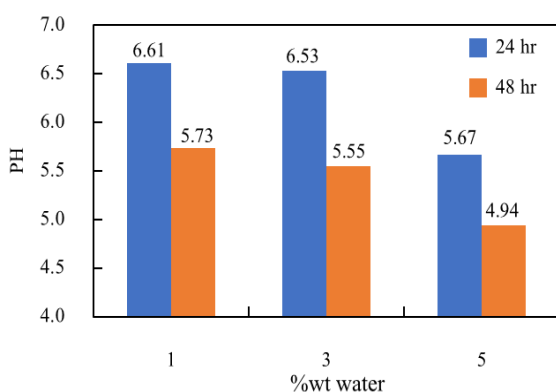
จากผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าความหนืดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณีที่ปนเปื้อนน้ำค่าความหนืดยังคงสูงกว่ากรณีน้ำมันพื้นฐานที่ไม่มีการปนเปื้อน เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 150°C ความหนืดสูงสุดกรณีน้ำมันปนเปื้อนน้ำมีขนาดประมาณ 2 เท่าของน้ำมันพื้นฐานที่ไม่ผ่านการใช้

รูปที่ 11 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นทดสอบโดยทำการวัดค่า PH ระดับค่า $\text{PH} < 7.0$ แสดงถึงความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้น สภาพความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นเกิดจากผลของปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะได้ผลิตภัณฑ์ของสารประกอบประเภทที่มีฤทธิ์เป็นกรดเช่น แอลกอฮอล์ (alcohols) แอลดีไฮด์ (aldehyde) และ คีโตน (ketone) ในรูปแบบ ROH [27]



รูปที่ 10 ผลของอุณหภูมิต่อความหนืดที่เวลาสุดท้าย

ดังนั้นเมื่อมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นจะได้สารประกอบที่เป็นกรดเพิ่มขึ้นด้วยและทำให้สภาพของน้ำมันมีปริมาณความเป็นกรดที่สูงขึ้น ดังนั้นจากกราฟรูปที่ 11 เมื่อเวลาผ่านไปน้ำมันทดสอบมีความเป็นกรดสูงขึ้นจากค่า PH ที่ลดลงต่ำกว่า 7 สะท้อนให้เห็นว่าในช่วงเวลาที่ปล่อยน้ำมันทดสอบไว้ 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมงตามลำดับนั้นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเมื่อพิจารณาผลการปนเปื้อนน้ำต่อสภาพความเป็นกรดพบว่าเมื่อปริมาณของน้ำที่ปนเปื้อนเพิ่มขึ้นสภาพความเป็นกรดของน้ำมันทดสอบสูงขึ้นด้วยในที่นี้จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า PH ในกรณีที่มีน้ำปนเปื้อนที่ 5%wt จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อทำการวัดที่ 24 ชั่วโมงและ 48 ชั่วโมง



รูปที่ 11 ระดับค่า PH ของน้ำมันปนเปื้อนน้ำ

จากผลการศึกษาการปนเปื้อนน้ำในน้ำมันหล่อลื่นจากการวัดความหนืดและปริมาณความเป็นกรด ค่าที่เพิ่มขึ้นนั้นแสดงให้เห็นว่าน้ำเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลให้อัตรา

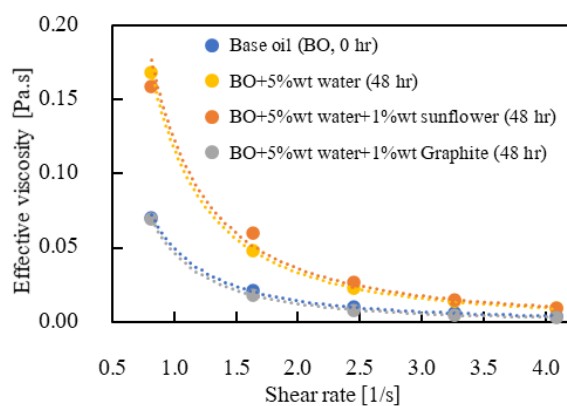
การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงขึ้น จากบทความของ P.Madhaven และ N.C.Werner [31] ได้แสดงผลการทดสอบและให้ความเห็นว่าน้ำส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ปัจจัยหลักที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นนั้นคือความร้อน ปริมาณออกซิเจนและตัวเร่งปฏิกิริยา บทความนี้มีความเห็นว่ามีความเป็นไปได้เมื่อปริมาณของน้ำเพิ่มขึ้นในขณะผสมโดยการกวนหรือปั่นภายใต้การให้ความร้อนจะเกิดจำนวนเม็ดหยดน้ำ (droplet) มากขึ้นการกระจายอยู่ในน้ำมันส่งผลให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสต่อประสานระหว่างน้ำกับน้ำมันมีมากขึ้น (water/oil interfacial area) เมื่อเม็ดหยดน้ำเคลื่อนที่หรือน้ำมันเกิดการไหลจะเกิดการเสียดสีที่ผิวสัมผัสประกอบกับการให้ความร้อนทำให้น้ำมันที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (R-H) แยกตัวเป็นอนุมูลอิสระและปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเข้าทำปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

สำหรับการศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อการรักษาสภาพของน้ำมันนั้นจะควบคุมปัจจัยภายนอกโดยการใช้ น้ำปนเปื้อนที่ 5%wt เท่า ๆ กันสำหรับทุกอัตราส่วนผสมของสารเติมแต่งที่ศึกษาและใช้ภาชนะปิดควบคุมการสัมผัสกับอากาศภายนอก ผลของการเติมสารเติมแต่งในน้ำมันที่ปนเปื้อนน้ำแสดงในรูปที่ 12 โดยแสดงค่าความหนืดของน้ำมันทดสอบที่ปล่อยทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง ทำการวัดความหนืดที่อุณหภูมิ 150°C รูปที่ 12 (ก)-(ค) แสดงสัดส่วนการเติมสารเติมแต่งน้ำมันดอกทานตะวันและผงนาโนกราฟไฟต์ในอัตราส่วน 1%wt, 3%wt และ 5%wt ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบกับค่าความหนืดในกรณีน้ำมันใหม่ที่ไม่มีการปนเปื้อนและไม่ผ่านการใช้ (Base oil, BO, 0 hr) ซึ่งเป็นกรณีที่น้ำมันหล่อลื่นปกติอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้และเปรียบเทียบกับกรณีน้ำมันพื้นฐานปนเปื้อนน้ำ 5%wt ที่ปล่อยทิ้งไว้ 48 ชั่วโมงซึ่งเป็นตัวแทนในกรณีที่น้ำมันเสื่อมคุณภาพอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นผลการเติมสารเติมแต่งถูกคาดหวังว่าจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับกรณี BO

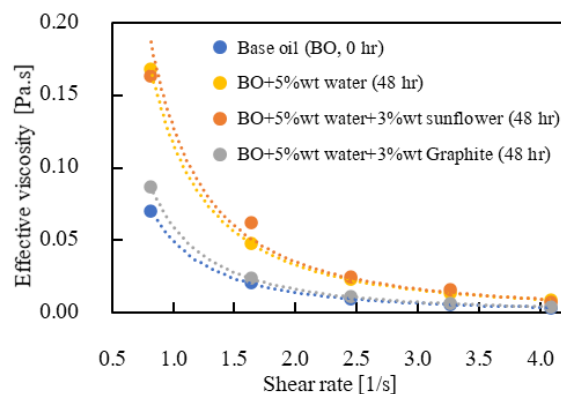
ผลการทดสอบวัดค่าความหนืดแสดงให้เห็นว่ากรณีที่เติมผงนาโนกราฟไฟต์เป็นสารเติมแต่งในทุกสัดส่วนผสมเทียบกับกรณีเติมน้ำมันดอกทานตะวันพบว่ากรณีใช้ผงนาโนกราฟไฟต์ได้ค่าความหนืดที่ใกล้เคียงกับกรณีน้ำมันพื้นฐานที่ไม่มีการ

ปนเปื้อนน้ำหรือกราฟเส้น BO มากที่สุด ในขณะที่การเติมน้ำมันดอกทานตะวันเป็นสารเติมแต่งในทุกสัดส่วนผสมพบว่าความหนืดมีค่าสูงและใกล้เคียงกับกรณีที่มีน้ำมันพื้นฐานปนเปื้อนน้ำ (BO+5%wt water) เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยมวลของผงนาโนกราฟไฟต์เพิ่มขึ้นพบว่าค่าความหนืดจะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามหลักการผสมของเหลวกับอนุภาคที่เป็นของแข็ง [32] อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นในที่นี้ยังคงมีค่าน้อยกว่ากรณีที่มีน้ำมันปนเปื้อนน้ำ

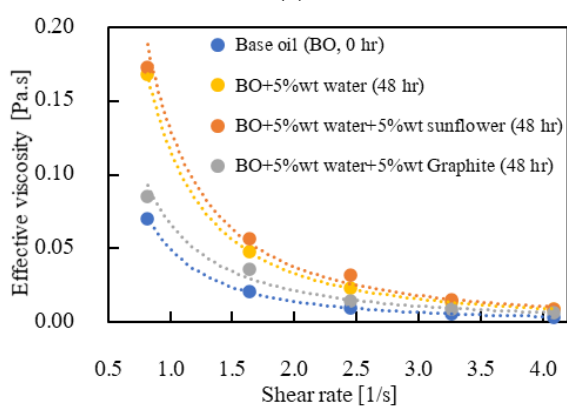
รูปที่ 12(ง) แสดงค่าความหนืดเริ่มต้นหลังจากผสมสารเติมแต่ง 5%wt (0 hr) และความหนืดสุดท้ายหลังจากปล่อยไว้ 48 ชั่วโมง (48 hr) ที่เวลาเริ่มต้นการผสมผงนาโนกราฟไฟต์ให้ค่าความหนืดที่สูงกว่ากรณีใช้น้ำมันดอกทานตะวันแต่เมื่อเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง กรณีที่ใช้ผงนาโนกราฟไฟต์ความหนืดเพิ่มขึ้นจากเวลาเริ่มต้นเล็กน้อย ส่วนการใช้น้ำมันดอกทานตะวันความหนืดเพิ่มขึ้นจาก



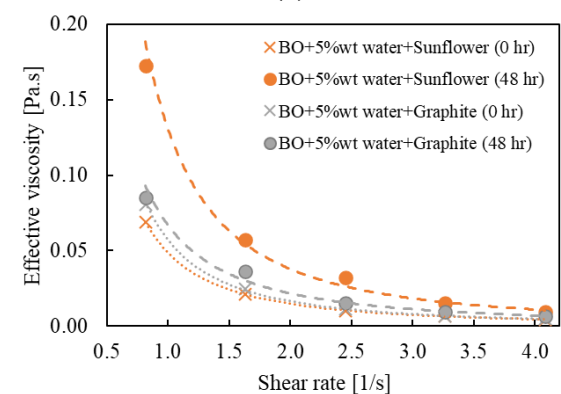
(ก)



(ข)



(ค)



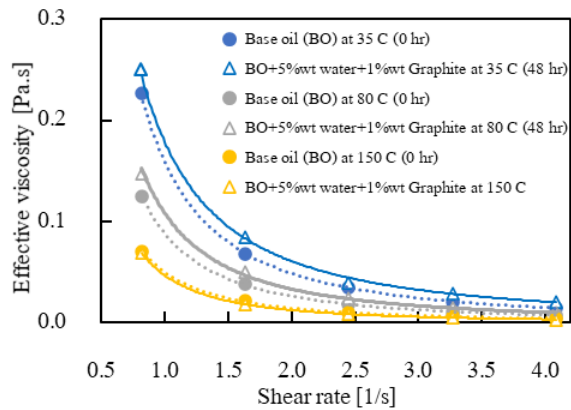
(ง)

รูปที่ 12 ความหนืดน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานปนเปื้อนน้ำผสมการเติมแต่งที่ $T = 150^\circ\text{C}$: (ก) 1%wt, (ข) 3%wt,

(ค) 5%wt, และ (ง) ความหนืดเริ่มต้นและสุดท้ายที่เติม 5%wt สารเติมแต่ง

เวลาเริ่มต้นค่อนข้างมาก การเพิ่มขึ้นของความหนืดในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นผลมาจากน้ำมันเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สำหรับการเติมผงนาโนกราฟไฟต์ในปริมาณ 1%wt ได้ค่าความหนืดที่ใกล้เคียงกรณี BO มากที่สุด เนื่องจากผลของการเพิ่มขึ้นของความหนืดเริ่มต้นเนื่องจากผสมอนุภาคของแข็งลดลง

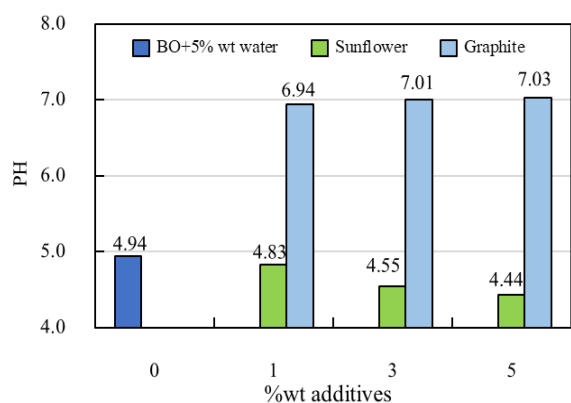
รูปที่ 13 ได้เปรียบเทียบความหนืดน้ำมันปนเปื้อนน้ำกรณีใช้ผงนาโนกราฟไฟต์ปริมาณ 1%wt ที่อุณหภูมิ 35°C , 80°C และ 150°C เปรียบเทียบกับกรณี BO ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติมผงนาโนกราฟไฟต์จะมีค่าความหนืดที่สูงกว่ากรณี BO โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 35°C และ 80°C อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นในที่นี้น้อยกว่ากรณีที่มีน้ำมันปนเปื้อนน้ำ (BO + 5%wt water) เมื่อพิจารณาตาม **รูปที่ 10** ประกอบที่อุณหภูมิ 35°C , 80°C และ 150°C ตามลำดับ



รูปที่ 13 ความหนืดน้ำมันทดสอบที่เวลาสุดท้ายภายใต้ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับน้ำมันสภาพดี

รูปที่ 14 แสดงปริมาณความเป็นกรดด้วยค่า PH หลังจากทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง พิจารณาในกรณีที่ได้เติมสารเติมแต่งเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการเติมสารเติมแต่งโดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมเปอร์เซ็นต์โดยมวล 1%wt 3%wt และ 5%wt ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากรณีที่เติมสารเติมแต่งชนิดผงนาโนกราไฟต์ทุกสัดส่วนผสมที่ศึกษาค่า PH มีค่าประมาณ 7.0 ซึ่งบ่งบอกถึงสภาพความเป็นกลาง ในขณะที่การเติมสารเติมแต่งชนิดน้ำมันดอกทานตะวันมีสภาพความเป็นกรดสูงที่สุดจากค่า PH ที่ต่ำที่สุดโดยเฉพาะที่สัดส่วนผสม 5%wt ค่า PH มีค่าเท่ากับ 4.44 และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีน้ำมันพื้นฐานปนเปื้อนน้ำที่ 5%wt พบว่าทุกสัดส่วนผสมน้ำมันดอกทานตะวันมีค่า PH ที่ต่ำกว่า ดังนั้นการใช้น้ำมันดอกทานตะวันส่งผลให้คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นลดลง

จากผลที่ได้ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการใช้น้ำมันดอกทานตะวันในสภาพของเหลวเป็นสารเติมแต่งไม่สามารถ



รูปที่ 14 ระดับค่า PH ภายใต้การผสมสารเติมแต่ง

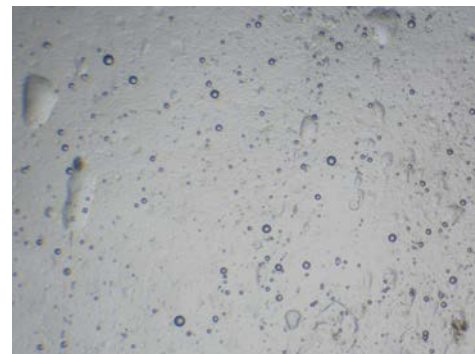
จะรักษาสภาพของน้ำมันจากการปนเปื้อนน้ำได้ จากข้อมูลค่าที่สูงขึ้นทั้งความหนืดและปริมาณความเป็นกรดซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวเป็นตัวบ่งบอกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [1–3] เนื่องจากน้ำมันจากพืชเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเช่นกันเมื่ออยู่ภายใต้ความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายเช่นเดียวกับน้ำมันพื้นฐาน โดยเฉพาะความเห็นของ C.Georgescu และคณะ [2] ได้แสดงให้เห็นว่าน้ำมันจากพืชมีจุดอ่อนในเรื่องการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันภายใต้การให้ความร้อน ดังนั้นน้ำมันดอกทานตะวันไม่ได้ส่งผลต่อการยับยั้งหรือชะลอการเกิดออกซิเดชันจากน้ำเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันแต่ในทางตรงกันข้ามตัวน้ำมันดอกทานตะวันเองเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจนด้วยทำให้เมื่อใช้น้ำมันดอกทานตะวันในสภาพของเหลวยังเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเห็นได้จากค่าความหนืดที่สูงที่สุดและความเป็นกรดสูงที่สุด (PH ต่ำสุด) อย่างไรก็ตามการเติมผงนาโนกราไฟต์ส่งผลดีต่อการรักษาสภาพน้ำมัน โดยเฉพาะการชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันดังที่เห็นได้จากผลของความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันพื้นฐานที่ไม่ผ่านการใช้และสภาพน้ำมันเป็นกลาง $PH \approx 7.0$ เนื่องจากผงนาโนกราไฟต์สามารถที่จะผสมเข้ากับน้ำมันและจับตัวกับน้ำได้จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ตามรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าการใช้ผงนาโนกราไฟต์แสดงในรูปที่ 15(ง) ก่อนข้างได้เนื้อผสมเป็นเนื้อเดียวได้ดีกว่ากรณีน้ำมันปนเปื้อนน้ำและกรณีการใช้น้ำมันดอกทานตะวันตามที่ได้แสดงในรูป 15 (ข) และ (ค) ตามลำดับ ในกรณีปนเปื้อนน้ำและใช้น้ำมันดอกทานตะวันน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมันเกิดเป็นเม็ดหยดน้ำจำนวนมากแต่ในกรณีใช้ผงนาโนกราไฟต์เม็ดหยดน้ำน้อยลงและมีขนาดที่เล็กลง หมายความว่าผงนาโนกราไฟต์เข้าจับตัวที่ผิวเม็ดหยดน้ำส่งผลทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสต่อประสานระหว่างน้ำกับน้ำมันน้อยลง (water/oil interfacial area) ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันถูกชะลอหรือทำให้ยากขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดได้ยากขึ้นด้วยเช่นกันจึงเป็นเหตุเป็นผลกับค่าความหนืดและความ

เป็นกรดที่ต่ำกว่าทั้งกรณีปนเปื้อนน้ำและกรณีใช้น้ำมันดอกทานตะวันเป็นสารเติมแต่ง **รูปที่ 15** ที่แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์หลังการผสมสาร โดยเครื่องผสม โดยที่ **รูปที่ 15(ก)** แสดงภาพของน้ำมันพื้นฐานก่อนปนเปื้อนน้ำและก่อนเติมสารเติมแต่งซึ่งจะสังเกตเห็นเป็นลักษณะเนื้อเดียวไม่มีสารอื่นแทรกตัวอยู่ **รูปที่ 15(ข)** แสดงการผสมระหว่างน้ำมันพื้นฐานกับน้ำ 5%wt จะสังเกตเห็นเป็นลักษณะของหยดเม็ดของน้ำกระจายตัวอยู่ในน้ำมันพื้นฐานซึ่งเป็นลักษณะการเกิดอิมัลชันแบบชั่วคราว (emulsion) จะเกิดในลักษณะนี้ได้เมื่อสารหล่อลื่นได้รับการรบกวนจากภายนอกเช่นการแกว่ง เขย่า การไหล เป็นต้น เมื่อปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลานานพอน้ำมันกับน้ำจะแยกชั้นกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสภาพของการใช้งานนั้นสารหล่อลื่นจะถูกรบกวนตลอดเวลาเนื่องจากการดูดสารหล่อลื่นเข้าไปใช้ในระบบที่หมุนเวียนตลอดเวลา การเกิดลักษณะดังกล่าวสารหล่อลื่นจะสูญเสียความสามารถในการรับภาระ เมื่อเกิดแรงกดจากชิ้นส่วนทางกลสัมผัสกันในพื้นที่เป็น

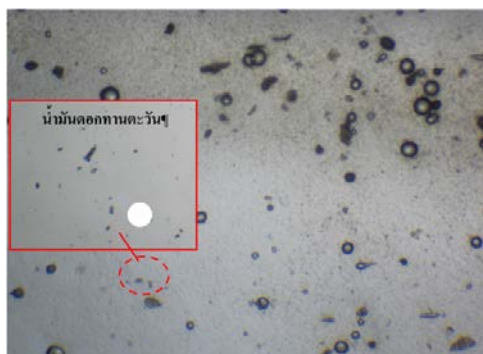
เม็ดหยดน้ำหรือเกิดโพรงอากาศบริเวณนั้นจะรับแรงได้ไม่ดีจึงส่งผลให้ชิ้นส่วนทางกลอาจเกิดการเสียดสีกันโดยตรงที่ผิวจึงทำให้ชิ้นงานเกิดการสึกหรอได้เร็วขึ้น **รูปที่ 15(ค)** แสดงการผสมระหว่างน้ำมันพื้นฐานและน้ำ 5%wt พร้อมกับเติมสารเติมแต่งชนิดน้ำมันดอกทานตะวัน 3%wt จากภาพแสดงให้เห็นว่าเกิดเม็ดหยดน้ำรูปทรงกลมแทรกตัวและกระจายอยู่ระหว่างเนื้อน้ำมันพื้นฐาน ส่วนน้ำมันดอกทานตะวันจะมีลักษณะไม่เป็นเม็ดรูปทรงกลมกระจายและแยกตัวจากเม็ดหยดน้ำ การเกิดลักษณะเช่นนี้มีผลเสียเช่นเดียวกับกรณีน้ำมันพื้นฐานปนเปื้อนน้ำตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น **รูปที่ 15(ง)** แสดงการผสมระหว่างน้ำมันพื้นฐานและน้ำ 5%wt พร้อมกับเติมสารเติมแต่งชนิดผงนาโนกราไฟต์ 3%wt จากภาพแสดงให้เห็นว่าผงกราไฟต์จะกระจายไปทั่วในเนื้อน้ำมันพื้นฐานตามที่เห็นเป็นจุดดำและยังคงมีเม็ดหยดน้ำทรงกลมอยู่บาง อย่างไรก็ตามระหว่างเม็ดหยดน้ำจะมีผงกราไฟต์แทรกตัวอยู่ระหว่าง



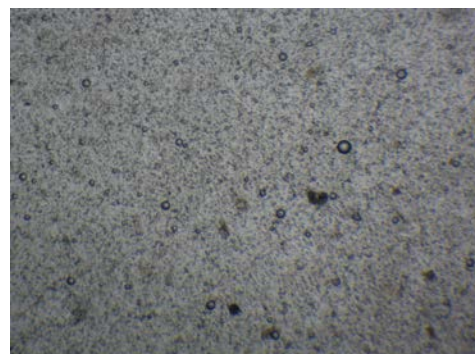
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ลักษณะการผสม (ก) Base oil (BO) (ข) BO+5%wt water (ค) BO+5%wt water+3%wt Sunflower และ (ง) BO+5%wt water+3%wt Graphit

เมื่อหยดน้ำจำนวนมากดังนั้นผงกราฟไฟต์ที่แทรกตัวอยู่มีความเป็นไปได้อาจมีส่วนช่วยรับภาระเมื่อเกิดแรงกดจากชิ้นงานที่สัมผัสกันทำให้สามารถลดการเสียดสีของผิวชิ้นงานโดยตรงจึงช่วยลดการสึกหรอ ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทดสอบการสึกหรอโดยใช้ผงกราฟไฟต์เป็นสารเติมแต่ง [15–18] และได้แสดงให้เห็นถึงการใช้อย่างเหมาะสมจะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและลดการสึกหรอ อย่างไรก็ตามการทดสอบเกี่ยวกับการสึกหรอยังคงมีความจำเป็นเพื่อยืนยันความเป็นไปได้ดังกล่าว

5. สรุป

บทความนี้ได้ทำการศึกษาผลการเติมสารเติมแต่ง 2 ชนิดได้แก่น้ำมันดอกทานตะวันและผงนาโนกราฟไฟต์ในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีน้ำปนเปื้อนโดยทำการวัดค่าคุณสมบัติของสารหล่อลื่นซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกสภาพน้ำมันได้แก่ความหนืดและค่าระดับความเป็นกรดจากการศึกษาสามารถที่จะสรุปได้ดังนี้

- 1) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ปนเปื้อนน้ำโดยที่ปริมาณน้ำมีมากขึ้นส่งผลทำให้ความหนืดเสื่อมคุณภาพจากค่าความหนืดและปริมาณความเป็นกรดที่สูงขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- 2) การเติมสารเติมแต่งประเภทน้ำมันดอกทานตะวันในสภาพของเหลวโดยตรงส่งผลเสียต่อสภาพของน้ำมันหล่อลื่นจากค่าความหนืดและปริมาณความเป็นกรดที่สูงขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- 3) การใช้ผงนาโนกราฟไฟต์ส่งผลดีต่อการรักษาสภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่ปนเปื้อนน้ำจากค่าความหนืดที่ใกล้เคียงกับน้ำมันพื้นฐานที่ไม่ผ่านการใช้และสภาพของน้ำมันมีความเป็นกลาง
- 4) ผงกราฟไฟต์มีแนวโน้มที่ดีที่จะเป็นตัวต้านการเกิดออกซิเดชันเนื่องจากการปนเปื้อนน้ำ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทาลัยบูรพา ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายต่าง ๆ และ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่สนับสนุนการใช้เครื่องมืออุปกรณ์การทดลองและสถานที่เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Y. El-Naggar, R. A. El-Adly, T. A. Altalhi, A. Alhadhrami, F. Modather, M. A. Ebiadb and A. Salemb, “Oxidation stability of lubricating base oils,” *Petroleum Science and Technology*, vol. 36, no. 3, pp. 179–185, 2018, doi: 10.1080/10916466.2017.1403450.
- [2] C. Georgescu, L. Deleanu and G. C. Cristea, “Tribological Behavior of Soybean Oil,” in *Soybean - Biomass, Yield and Productivity*, London, United Kingdom: IntechOpen, 2018, ch. 5, pp. 1–36. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/64105>, doi: 10.5772/intechopen.81234
- [3] J. K. Mannekote and S. V. Kailas, “The Effect of Oxidation on the Tribological Performance of Few Vegetable Oils,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol.1, no. 2, pp.91–95, 2012, doi: 10.1016/S2238-7854(12)70017-0.
- [4] N. Canter, “Tribology & Lubrication Technology,” Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Park Ridge, IL, USA, Special report use of antioxidants in automotive lubricants, 2008.
- [5] G. Karmakar and P. Ghosh, “Green Additives for Lubricating Oil,” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 1364–1370, 2013, doi: 10.1021/sc400181g.
- [6] M. A. Maleque, H. H. Masjuki and S. M. Sapuan, “Vegetable-based biodegradable lubricating oil additives,” *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 55, pp. 137–143, 2003, doi: 10.1108/00368790310470976.
- [7] P. Ghosh, T. Das, D. Nandi, G. Karmakar and A. Mandal, “Synthesis and Characterization of Biodegradable Polymer – Used as a Pour Point Depressant for Lubricating Oil,” *International Journal of Polymeric*

- Materials*, vol. 59, no. 12 pp. 1008-1017, 2010, doi: 10.1080/00914037.2010.504156.
- [8] E. Durak and F. Karaosmanoğlu, "Using of Cottonseed Oil as An Environmentally Accepted Lubricant Additive," *Energy Sources*, vol. 26, no. 7, pp. 611-625, 2004, doi: 10.1080/00908310490438605.
- [9] S. B. Mousavi, S. Z. Heris and P. Estellé, "Experimental comparison between ZnO and MoS₂ nanoparticles as additives on performance of diesel oil-based nano lubricant," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, 2020, Art. no. 5813, doi: 10.1038/s41598-020-62830-1.
- [10] H. Wu, J. Zhao, W. Xia, X. Cheng, A. He, J. Yun, L. Wang, H. Huang, S. Jiao, L. Huang, et al., "A study of the tribological behaviour of TiO₂ nano-additive water-based lubricants," *Tribology International*, vol. 109, pp. 398-408, 2017, doi: 10.1016/j.triboint.2017.01.013.
- [11] A. Beheshti, Y. Huang, K. Ohno, I. Blakey and J. R. Stokes, "Improving tribological properties of oil-based lubricants using hybrid colloidal additives," *Tribology International*, vol. 144, 2020, Art. no. 106130, doi: 10.1016/j.triboint.2019.106130.
- [12] H. T. Nguyen and K. H. Chung, "Assessment of Tribological Properties of Ti₃C₂ as a Water-Based Lubricant Additive," *Materials*, vol. 13, no. 23, 2020, Art. no. 5545, doi: 10.3390/ma13235545.
- [13] G. Cristea, D. Cazamir, D. Dima, C. Georgescu and L. Deleanu, "Influence of TiO₂ as nano additive in rapeseed oil," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 444, no. 2, 2018, Art. no. 022011, doi: 10.1088/1757-899X/444/2/022011.
- [14] S. D. Fernández-Silva, M. A. Delgado, C. Roman and M. García-Morales, "Rheological and Tribological Properties of Nanocellulose-Based Ecolubricants," *Nanomaterials (Basel)*, vol. 11, no. 11, pp. 1-14, 2021, Art. no. 34835751, doi: 10.3390/nano11112987.
- [15] M. Niu and J. Qu, "Tribological properties of nano-graphite as an additive in mixed oil-based titanium complex grease," *The royal society of chemistry*, vol. 8, pp. 42133-42144, 2018, doi: 10.1039/c8ra08109c.
- [16] E. Omrani, A. Siddaiah, A. D. Moghadam, U. Garg, P. Rohatgi and P. L. Menezes, "Ball milled graphene nano additives for enhancing sliding contact in vegetable oil," *nanomaterials*, vol.11, no. 3, 2021, Art. no. 610, doi: 10.3390/nano11030610.
- [17] G. C. Cristea, A. Radulescu, C. Georgescu, I. Radulescu and L. Deleanu, "Influence of additive concentration in soybean oil on rheological and tribological behavior," in *International conference of aerospace sciences "AEROSPATIAL2018"*, Romania, 2018, pp. 35-43, doi: 10.13111/2066-8201.2018.10.4.4.
- [18] L. Kirkhorn, O. Gutnichenko, O. Melnyk, V. Bushlya and J. E. Stahl, "Nano graphite flakes as lubricant additive," in *Proc.of the 6th Swedish production symposium*, Gothenburg, Sweden, 2014, pp.1-7.
- [19] P. S. Owuor, A. Khan, C. L. Leon, S. Ozden, R. Priestley, C. Arnold, N. Chopra and C. S. Tiwary, "Roadblocks faced by graphene in replacing graphite in large-scale applications," *Oxford open materials science*, vol. 1, no. 1, pp.1-19, 2021, doi: 10.1093/oxfmat/itab004.
- [20] Safety Data Sheet Mobilux EP0 grease, ExxonMobil, Apr. 24, 2022. [Online]. Available: <https://www.msds.exxonmobil.com/IntApps/psims/Download.aspx?ID=743086>.
- [21] V. Cortes, K. Sanchez, R. Gonzalez, M. Alcoutlabi and J. A. Ortega, "The performance of SiO₂ and TiO₂ nanoparticles as lubricant additives in sunflower oil," *Lubricants*, vol.8, no. 1, pp. 1-13, 2020, doi: 10.3390/lubricants8010010.

- [22] A. Sarwar, S. Vunguturi and A. Ferdose, "A study on smoke point and peroxide values of different widely used edible oils," *International journal of engineering technology science and research*, vol. 3, no. 5, pp. 271–273, 2016.
- [23] J. Ashrafi, A. Semnani, H. S. Langeroodi and M. Shirani, "Direct acetylation of sunflower oil in the presence of boron trioxide catalyst and the adduct usage as the base stock and lubricant additive," *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, vol. 31, no. 1, pp.39–49, 2017, doi: 10.4314/bcse.v31i1.4.
- [24] *Graphite nanoparticles/nanopowder*, American Elements, Jun.15, 2022. [Online]. Available: <https://www.americanelements.com/graphite-nanoparticles-nanopowder-7782-42-5>
- [25] B. J. Hamrock, S. R. Schmid and B. O. Jacobson, "Lubricant Properties," in *Fundamentals of fluid film lubrication*, 2nd ed., Boca Raton, NM, USA: CRC Press, 2004, ch. 4, sec. 4.17, pp. 122–123.
- [26] D. Choi, S. Yun and W. Choi, "An exact solution for power-law fluids in a slit microchannel with different zeta potentials under electroosmotic forces," *Micromachines (Basel)*, vol. 9, no. 10, 2018, Art. no. 504, doi: 10.3390/mi9100504.
- [27] M. Soleimani, L. Dehabadi, L. D. Wilson and L. G. Tabil, "Antioxidants Classification and Applications in Lubricants," in *Lubrication - Tribology, Lubricants and Additives*, London, United Kingdom: IntechOpen, 2018, ch. 2, pp. 23–42 [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/58293>.
- [28] S. Yotsawimonwat, S. Okonoki, K. Krauel, J. Sirithunyalug, B. Sirithunyalur and T. Rades, "Charaterisation of microemulsions containing orange oil with water and propylene glycol as hydrophilic components," *Pharmazie*, vol.61, no. 11, pp. 920–926, 2006.
- [29] O. Juntarasakul and K. Maneeintr, "Evaluation of stability and viscosity measurement of emulsion from oil from production in northern oilfield in Thailand," *Iop conference series: Earth and environmental science*, vol. 140, 2018, Art. no. 012024, doi: 10.1088/1755-1315/140/1/012024.
- [30] D. S. Kolotova, Y. A. Kuchina, L. A. Petrova, N. G. Voron'ko and S. R. Derkach, "Rheology of water-in-crude oil emulsions: influence of concentration and temperature," *colloids and interfaces*, vol. 2, no. 4, 2018, Art. no. 64, doi: 10.3390/colloids2040064.
- [31] P. Madhaven and N. C. Werner, "Contamination Control for Extending Fluid Service Life." <https://www.machinerylubrication.com/Read/714/extending-fluid-life> (accessed: Jun.10, 2022).
- [32] J. Wen, J. Zhang and M. Wei, "Effective viscosity prediction of crude oil-water mixtures with high water fraction," *Journal of petroleum science and engineering*, vol. 147, pp.760–770, 2016, doi: 10.1016/j.petrol.2016.09.052.