

การบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยกรดอะซิติก พร้อมกับการดูดซับโลหะหนักด้วยถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา Acetic Acid Treatment of Used Lubricating Oil with Heavy Metals Adsorption by Activated Carbon from Water Hyacinth

พัชรี คำธิตา* และธนกรกาญจน์ ลิ้มเลิศเจริญนิช

ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

ถนนพหลโยธิน ตำบลหลักหก อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000

Patcharee Kamthita* and Thanakornkan Limlertchareonwanit

Department of Chemical and Material Engineering, College of Engineering, Rangsit University,

Paholyothin Road, Lak-hok, Muang, Pathum Thani 12000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยกรดอะซิติกและดูดซับโลหะหนักด้วยถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา โดยใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนองและออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ศึกษาตัวแปร คือ ปริมาณกรดอะซิติกต่อน้ำมันหล่อลื่นและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อการกำจัดกากตะกอน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดปริมาณกากตะกอนกับตัวแปรสองตัวคือ ปริมาณกรดอะซิติกต่อน้ำมันหล่อลื่นและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการกำจัดกากตะกอน โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณกรดอะซิติกต่อน้ำมันหล่อลื่น 11.2 % โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 45 °C ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที สามารถกำจัดกากตะกอนของสิ่งเจือปนได้ 15.30 % นอกจากนี้ได้เปรียบเทียบการดูดซับโลหะหนักในน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการบำบัดด้วยกรดแล้ว พบว่าการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากผักตบชวาสามารถลดปริมาณโลหะหนักได้มากกว่าการดูดซับด้วยแอคทีเวเตดเคลย์ โดยมีปริมาณโลหะตะกั่ว เหล็ก และสังกะสีเหลืออยู่ 11.25, 0.34 และ 366 ppm ตามลำดับ

คำสำคัญ : น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว; กรดอะซิติก; ถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา; การกำจัดกากตะกอน; เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง

Abstract

In this research, the treatment of used lubricating oil by acetic acid and heavy metals adsorption with activated carbon from water hyacinth have been studied. The response surface

methodology (RSM) based on Central Composite Design (CCD) was used to investigate the effects of two parameters, such as the amounts of acetic acid and the reaction temperature, on the acid sludge removal. The regression quadratic equation has been presented to show the relation between the percentage of acid sludge removal and two parameters. The results revealed that the reaction temperature is the important parameter. The optimum conditions were: 11.2 %v acetic acid and the reaction temperature of 45 °C with the reaction time of 60 min. The acid sludge removal under the optimized conditions was 15.30 %. In addition, the adsorption of heavy metals in acid treated oils has been compared. It was found that adsorption with activated carbon from water hyacinth can reduce the amount of heavy metals rather than that of adsorption with activated clay. The content of lead, iron and zinc remained at 11.25, 0.34 and 366 ppm, respectively.

Keywords: used lubricating oil; acetic acid; activated carbon from water hyacinth; acid sludge removal; response surface methodology

1. บทนำ

น้ำมันหล่อลื่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบและเติมสารปรับปรุงคุณภาพให้มีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งาน เช่น สารป้องกันสนิมและการกัดกร่อน โดยมีหน้าที่หล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์เป็นฟิล์มบาง ๆ เคลือบผิวของชิ้นส่วนโลหะเพื่อป้องกันการเสียดสีของโลหะโดยตรง ช่วยทำความสะอาดและระบายความร้อนของเครื่องยนต์ อีกทั้งช่วยป้องกันการรั่วซึมทำให้เครื่องยนต์มีกำลังเต็มที่ แต่ถึงอย่างไรน้ำมันหล่อลื่นก็มีการเสื่อมสภาพตามการใช้งานเนื่องจากในขณะที่เครื่องยนต์ทำงานมีการจุระเบิดเกิดความร้อนจนทำให้เกิดการแตกตัวขององค์ประกอบในน้ำมันหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีผลทำให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมคุณภาพในด้านความหนืด ความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน นอกจากนี้การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดเขม่า ยางเหนียว ถ้ำสิ่งสกปรก และโลหะหนักที่เกิดจากการเสียดสีของแหวนลูกสูบทำให้เกิดการสึกกร่อนของผิวโลหะปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น จนกระทั่งน้ำมันหล่อลื่นหมดสภาพการใช้งาน

จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นใหม่ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วมีจำนวนมากขึ้นส่งผลกระทบต่อการจัดเก็บ การปลอมปน รวมทั้งกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีการวิจัยเกี่ยวกับการรีไซเคิลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้งานได้อีก โดยการกำจัดสิ่งเจือปนต่าง ๆ และสารเติมแต่งที่เสื่อมคุณภาพออกไป เพื่อให้ได้น้ำมันพื้นฐานและนำไปปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเติมแต่งเป็นน้ำมันหล่อลื่นต่อไป ซึ่งกระบวนการรีไซเคิลนี้จะประโยชน์ในการช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติจากน้ำมันดิบได้อีกทางหนึ่ง

กระบวนการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเป็นการรีไซเคิลให้น้ำมันหล่อลื่นมีความบริสุทธิ์สามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่ ซึ่งมีหลายวิธี เช่น การบำบัดด้วยสารเคมีเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกไปโดยการใช้กรดแก่ เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก ที่อุณหภูมิสูงและความเข้มข้นของกรดสูง [1,2] การบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยการกลั่นเพื่อกำจัดความชื้น และกลั่นแบบสุญญากาศเพื่อแยกส่วนที่

เป็นน้ำมันหล่อลื่นออกจากตะกอนสารแขวนลอยที่ปนเปื้อนในน้ำมัน และดูดซับสิ่งเจือปนด้วยแอคติเวเตดเคลย์ และยังมีการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยการใช้กรดและดูดซับด้วยแอคติเวเตดเคลย์ เปรียบเทียบกับวิธีการใช้ตัวทำละลายสกัดสิ่งเจือปนและดูดซับด้วยแอคติเวเตดเคลย์ ซึ่งพบว่าการบำบัดด้วยกรดเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนนั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ตัวทำละลาย [3-5] นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการปรับสภาพน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยสารดูดซับชนิดต่าง ๆ เช่น แอคติเวเตดเบนโทไนท์ ดินฟอสไฟต์ ถ่านกัมมันต์ พบว่าการบำบัดด้วยกรดซัลฟิวริกและดูดซับด้วยแอคติเวเตดเคลย์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงน้ำมันที่ใช้แล้วทำให้ได้น้ำมันที่มีสมบัติด้านความหนืด ความถ่วงจำเพาะ และค่ากรดใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน [6] แต่การใช้กรดซัลฟิวริกที่เป็นกรดแก่ก็มีข้อจำกัด เนื่องจากกรดซัลฟิวริกสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบที่อยู่ในน้ำมัน เช่น สารไฮโดรคาร์บอนจำพวกพาราฟินและแนฟทีน ทำให้เกิดสารพอลิเมอร์ส่งผลต่อสมบัติของน้ำมันได้ ซึ่งได้มีการนำกรดอะซิติกที่เป็นกรดอ่อนมาใช้ในการบำบัดแทนการใช้กรดแก่เพื่อไม่ให้เกิดการทำลายโครงสร้างของน้ำมัน [1,2] ทั้งนี้มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสิ่งเจือปน ดังนั้นการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดยการกำจัดสิ่งเจือปนที่เกิดจากการใช้งานด้วยการใช้กรดอะซิติก โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณกากตะกอน (acid sludge) ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากับกรด คือ ปริมาณของกรดอะซิติกต่อน้ำมันหล่อลื่นและอุณหภูมิที่ใช้ในการบำบัดด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) และวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (central composite design, CCD) เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

นอกจากนี้ได้เพิ่มกระบวนการดูดซับโลหะหนักด้วยแอคติเวเตดเคลย์เปรียบเทียบกับ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ได้จากผักตบชวา ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำผักตบชวาที่เป็นวัชพืชมามาใช้ให้เกิดประโยชน์

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

น้ำมันหล่อลื่นยี่ห้อ Castrol magnetic professional A5 5W-30 ก่อนและหลังการใช้งานด้วยระยะทางกว่า 10,000 กิโลเมตร กรดอะซิติกเข้มข้น (glacial acetic acid, CH_3COOH) โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride, NaCl) แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO) แอคติเวเตดเคลย์ (commercial activated clay) และผักตบชวา

2.2 การบำบัดน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยกรดอะซิติกและการดูดซับ

2.2.1 การปรับสภาพน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว นำน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้ว (used lubricating oil) มาตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สิ่งสกปรกตกตะกอนลงสู่ด้านล่าง กรองเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนขึ้นต้นด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ และกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 120°C เพื่อกำจัดความชื้น เก็บใส่ภาชนะปิดสนิทก่อนนำไปผ่านกระบวนการบำบัดด้วยกรด

2.2.2 การบำบัดด้วยกรดอะซิติก ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นด้วยกรดอะซิติกโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) ศึกษาตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร คือ ปริมาณกรดอะซิติกต่อน้ำมันหล่อลื่น (A) และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (T) โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาคงที่ 60 นาที ซึ่งกำหนดรหัสของ 2 ตัวแปร 5 ระดับ ดังตารางที่ 1 มีจำนวน 13 การทดลอง

ตารางที่ 1 การออกแบบการทดลองแบบ CCD โดยมี 2 ตัวแปรอิสระ และค่าของตัวแปร 5 ระดับ ที่ใช้ในกระบวนการบำบัด

ตัวแปรอิสระ	สัญลักษณ์	ค่าระดับ				
		-1.414	-1	0	+1	+1.414
ปริมาณกรดอะซิติกต่อน้ำมันหล่อลื่น (%v)	A	3.5	6	12	18	20.5
อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	T	25.86	30	40	50	54.14

ขั้นตอนการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นด้วยกรดอะซิติกมีดังนี้ นำน้ำมันหล่อลื่นที่ปรับสภาพแล้ว ปริมาณ 100 mL ปรับอุณหภูมิและเติมกรดอะซิติกเข้มข้นตามการออกแบบการทดลองแบบ CCD ในตารางที่ 1 กวนผสมด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 60 นาที เมื่อกวนผสมน้ำมันหล่อลื่นกับกรดอะซิติกตามสภาวะที่กำหนดแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการแยกชั้นของน้ำมันกับกากตะกอน (acid sludge) ที่จมอยู่ส่วนล่าง นำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แยกส่วนของน้ำมันออกจากกากตะกอนและวัดปริมาณกากตะกอนที่กำจัดได้ และใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนองในการประมวลผลด้วยโปรแกรม SigmaPlot 12 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองเปอร์เซ็นต์การกำจัดกากตะกอนกับตัวแปรอิสระ ปริมาณกรดอะซิติกต่อน้ำมันหล่อลื่น และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการถดถอยกำลังสอง ดังสมการ (1) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นด้วยกรดอะซิติก โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ประมวลได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณกากตะกอนโดยนำเสนอในรูปแบบกราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองและกราฟโครงร่าง

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 \quad (1)$$

โดยที่ y เป็นผลตอบสนอง X_i, X_j เป็นตัวแปรอิสระ

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$ และ β_{ij} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ k เป็นจำนวนของตัวแปร

2.2.3 การทำให้เป็นกลาง นำน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยกรดและแยกกากตะกอนแล้วมาทำให้เป็นกลางเพื่อกำจัดกรดอะซิติกที่เหลืออยู่ โดยการเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 4-7 %w/v กวนผสมด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 20 นาที วัดค่าความเป็นกรดต่างให้มีค่าเป็นกลาง นำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และแยกตะกอนออกด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ

2.2.4 การดูดซับโลหะหนัก โดยดูดซับโลหะหนักในน้ำมันหล่อลื่นเปรียบเทียบกับระหว่างสารดูดซับชนิดแอคติเวเตดเคลย์กับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวา โดยนำน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยกรดอะซิติกและทำให้เป็นกลางแล้วมาเติมสารดูดซับแต่ละชนิดตามลำดับ ใช้ปริมาณของสารดูดซับ 20 %w/v ของน้ำมันหล่อลื่นที่ต้องการดูดซับ กวนผสมด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิที่ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที และแยกสารดูดซับออกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ แยกส่วนของน้ำมันไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ วิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา โดยใช้ผักตบชวาจากคลองรังสิต นำมาตัดเฉพาะส่วนของ

ลำต้นขนาด 2-3 เซนติเมตร ฉีกและผึ่งแดดให้แห้ง 1-2 วัน อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง บดให้ละเอียดขนาด 300-600 μm จากนั้นกระตุ่นผิวด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 25 %wt ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง กรองแยกผงผักตบชวาและอบให้แห้ง นำไปเผาคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ล้างผงถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยน้ำกลั่นหลายรอบและอบให้แห้ง บดให้ละเอียดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 μm เก็บใส่ภาชนะปิดสนิท นำไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวากับวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET)

2.3 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่บำบัดแล้ว

นำน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิด คือ น้ำมันหล่อลื่นใหม่ (fresh lube oil) น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (used lube oil) น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการบำบัดด้วยกรดอะซิติก (treated lube oil 1) น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการบำบัดด้วยกรดอะซิติกและดูดซับด้วยแอคทีเวเตดเคลย์ (treated lube oil 2) และน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการบำบัดด้วยกรดอะซิติกและดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา (treated lube oil 3) มาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ดังนี้

2.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก โดยนำน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก สังกะสี เหล็ก และตะกั่วด้วยเครื่อง atomic absorption spectrometer (AAS) ซึ่งประกอบด้วย flame atomization (FA) รุ่น spectrAA 220

2.3.2 การวัดความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ โดยบรรจุน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดในขวดพิกโนมิเตอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร ชั่งน้ำหนักก่อนและหลัง คำนวณความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

2.3.3 การวัดความหนืด โดยใช้อุปกรณ์วัด

ความหนืด Cannon-fenske viscometer size 200 ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 40 และ 100 °C ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D-455 วัดเวลาที่น้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดไหลผ่านแคปิลารี (efflux time, s) คำนวณความหนืดเชิงจลน์ (kinematic viscosity, mm^2/s) จาก $\text{kinematic viscosity} = (\text{efflux time}) (\text{constant})$ (2) โดยที่ ค่าคงที่ (constant) สำหรับ viscometer size 200 = $0.1034 \text{ mm}^2/\text{s}^2$

2.3.4 การวิเคราะห์ค่าดัชนีความหนืด (viscosity index, VI) โดยคำนวณตามมาตรฐาน ASTM D2270 [8] กรณีที่ความหนืดเชิงจลน์ของน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 100 °C มีค่ามากกว่า 100 mm^2/s ให้คำนวณค่าดัชนีความหนืดดังสมการ (3)

$$VI = \{[(\text{antilog } N) - 1] \div 0.00715\} + 100 \quad (3)$$

โดยที่ $N = (\log H - \log U) \div \log Y$; U = ความหนืดเชิงจลน์วัดที่อุณหภูมิ 40 °C, mm^2/s ; Y = ความหนืดเชิงจลน์วัดที่อุณหภูมิ 100 °C, mm^2/s ; H = ค่าพื้นฐานของความหนืดเชิงจลน์จากตารางความหนืดในมาตรฐาน ASTM D2270

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 สภาพที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยกรดอะซิติก

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว โดยออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางร่วมกับเทคนิคพื้นผิวตอบสนองในการประมวลผลทางสถิติและการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองเปอร์เซ็นต์การกำจัดกากตะกอน (Y) กับ 2 ตัวแปรอิสระ คือ ปริมาณกรดอะซิติกต่อน้ำมันหล่อลื่น (A) และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (T) สอดคล้องกับสมการถดถอยกำลังสองดังสมการ (4) ที่มี

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) 0.94 และค่านัยสำคัญ 0.0003 โดยมีค่า p-value ของตัวแปรอิสระ A และ T เท่ากับ 0.2880 และ 0.0076 ตามลำดับ ซึ่งตัวแปรอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดกากตะกอนอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรร่วมระหว่างปริมาณกรดอะซิติกต่อ

น้ำมันหล่อลื่นกับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (AT) มีค่า p-value เท่ากับ 0.056 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญและมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดกากตะกอน โดยเปรียบเทียบผลตอบสนองจากการทดลองกับผลที่ประมวลได้จากสมการถดถอยกำลังสอง ดังตารางที่ 2

$$Y = 62.3572 - 1.3189A - 3.2374T - 0.0148A^2 + 0.0439T^2 + 0.0517AT \quad (4)$$

ตารางที่ 2 ผลของตัวแปรที่มีต่อผลตอบสนองเปอร์เซ็นต์การกำจัดกากตะกอนตามแผนการทดลองแบบ CCD

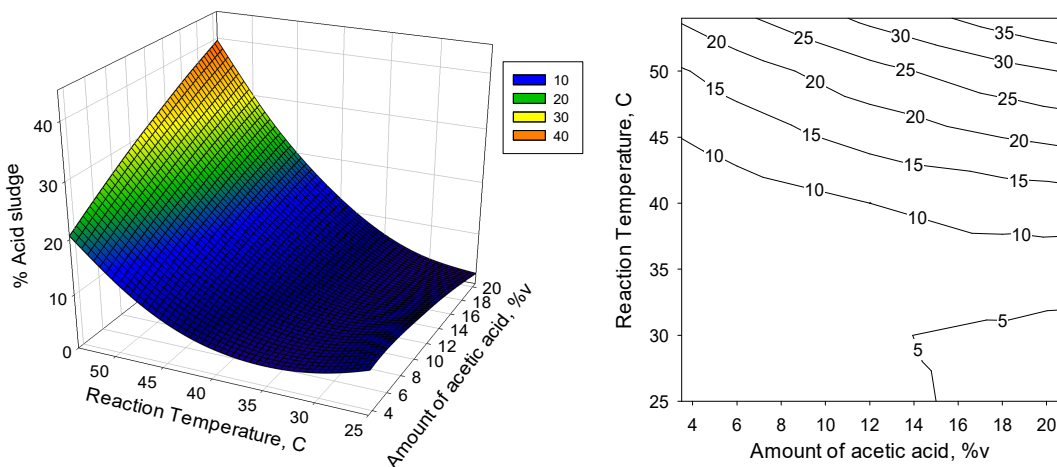
การทดลองที่	ตัวแปรอิสระ		เปอร์เซ็นต์การกำจัดกากตะกอน	
	A, %v	T, °C	การทดลอง	การประมวลผล
1	6	30	5.72	5.63
2	18	30	2.24	4.13
3	6	50	15.20	17.38
4	18	50	24.12	28.28
5	3.5	40	6.23	5.60
6	20.5	40	15.68	12.25
7	12	25.86	6.52	6.09
8	12	54.14	35.12	31.48
9	12	40	9.75	10.00
10	12	40	9.92	10.00
11	12	40	10.01	10.00
12	12	40	10.54	10.00
13	12	40	9.78	10.00

เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการถดถอยกำลังสองที่ได้ในสมการ (4) มาประมวลผลด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรทั้งสองที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดกากตะกอนด้วยโปรแกรม SigmaPlot 12 แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนอง (response surface plot) และกราฟโครงร่าง (contour plot) โดยพล็อตระหว่าง 2 ตัวแปร

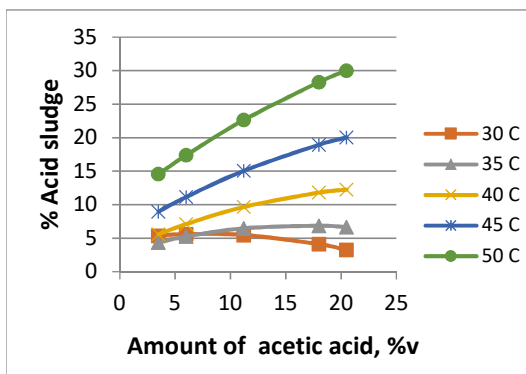
กับผลตอบสนอง ดังรูปที่ 1 พบว่าปริมาณของกรดอะซิติกต่อน้ำมันหล่อลื่นและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กันและมีผลต่อการกำจัดกากตะกอนในน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว เนื่องจากในขณะที่ใช้งานน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องยนต์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดสารจำพวกอัลคิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน และ

สารจำพวกพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน [9] เมื่อเติมกรดลงไปทำปฏิกิริยา ณ อุณหภูมิที่เหมาะสม กรดจะทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดส์หรือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้สารพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นจึงแยกชั้นเป็นกากตะกอน

(acid sludge) ที่มีลักษณะชั้นเหนียวอยู่ส่วนล่าง ซึ่งการใช้กรดอะซิติกที่เป็นกรดอ่อนมีข้อดีที่ไม่ทำลายโครงสร้างของสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันหล่อลื่น [1]



รูปที่ 1 กราฟพื้นผิวตอบสนองและกราฟโครงร่างของตัวแปรที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดกากตะกอน



รูปที่ 2 ผลของตัวแปรปริมาณกรดอะซิติกและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อปริมาณกากตะกอน

ผลของการกำจัดกากตะกอนดังรูปที่ 2 เมื่อใช้ปริมาณกรดเพิ่มขึ้นทำปฏิกิริยากับน้ำมันที่อุณหภูมิต่ำ (30-35 °C) พบว่าเกิดปฏิกิริยาได้กากตะกอนใน

ปริมาณน้อย อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิต่ำน้ำมันมีความหนืดมากจึงเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดกับสารประกอบในน้ำมันได้น้อย ขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น (40-50 °C) สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น และเมื่อเติมกรดมากขึ้นทำให้ได้ปริมาณกากตะกอนเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่งที่ปริมาณกรดมากเกินไป สังเกตได้จากกากตะกอนที่แยกชั้นไม่ชัดเจนเมื่อปริมาณกรดต่อน้ำมันหล่อลื่นมากกว่า 12 %v

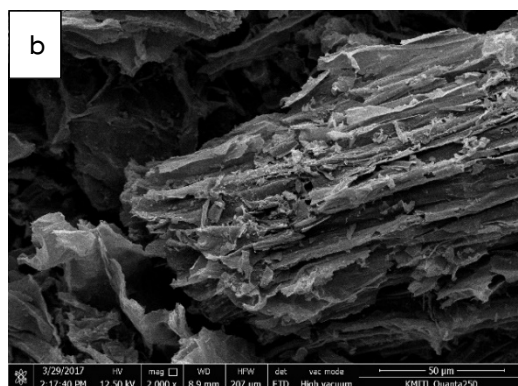
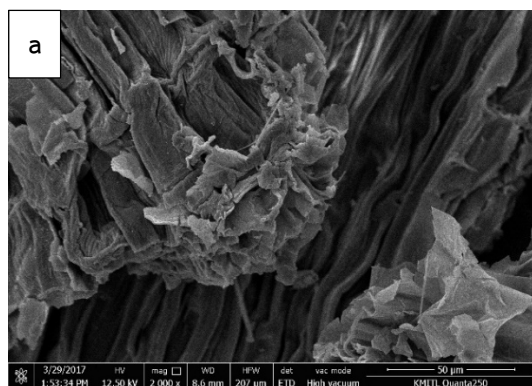
นอกจากนี้การกำจัดกากตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นออกไปมากจะทำให้ได้ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นภายหลังการกำจัดกากตะกอนต่ำซึ่งไม่คุ้มค่างับต้นทุนการบำบัด แต่ในขณะเดียวกันหากกำจัดกากตะกอนออกน้อยเกินไป อาจทำให้ได้น้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณภาพต่ำ เพราะยังคงมี

สิ่งเจือปนต่าง ๆ หลงเหลืออยู่ [2,4] จึงพิจารณาเปอร์เซ็นต์การกำจัดกากตะกอนที่เหมาะสมประมาณ 15 % เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียน้ำมันมากเกินไป จากการประมวลผลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการ (4) มีหลายสภาวะที่ทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดกากตะกอนอยู่ในช่วง 15 % ซึ่งพบว่าสภาวะที่ใช้ปริมาณกรดต่ำกว่า 5 %v จะต้องทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงถึง 50 °C หรือสภาวะที่ใช้อุณหภูมิต่ำจะไม่สามารถกำจัดกากตะกอนได้ถึง 10 % ดังนั้นจึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยกรดอะซิติกเข้มข้น คือ ปริมาณกรดอะซิติกต่อน้ำมันหล่อลื่น 11.2 %v ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 45 °C และใช้เวลา 60 นาที ซึ่งจากการประมวลผลในสมการ (4) สามารถกำจัดกากตะกอนได้ 15.05 % และได้ทดสอบจริงในการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยกรดอะซิติกเข้มข้นที่สภาวะดังกล่าวพบว่าสามารถกำจัดกากตะกอนได้เฉลี่ย 15.30 ± 0.50 %

3.2 คุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการบำบัดด้วยกรดอะซิติกและดูดซับโลหะหนัก

น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้ว จะมีสิ่งเจือปนอยู่มากจากการจุดระเบิดหรือการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เกิดคราบเขม่าสารประกอบที่เกิดจาก

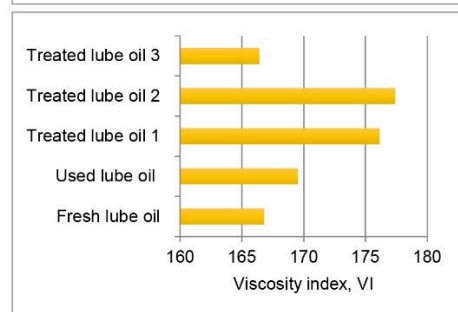
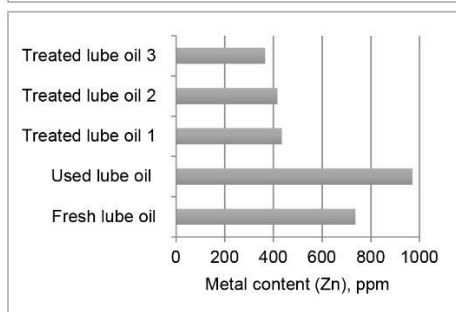
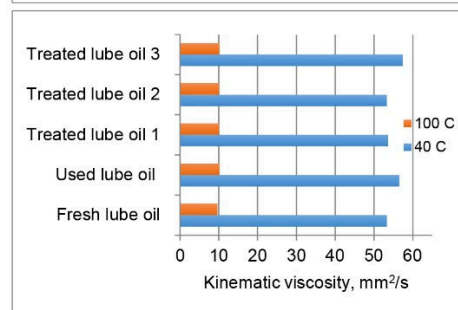
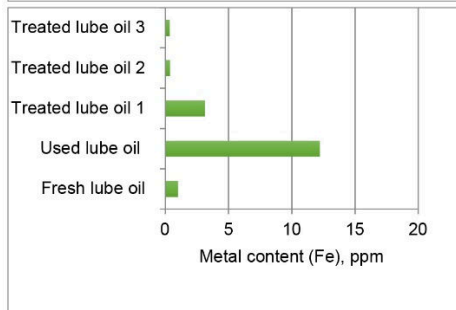
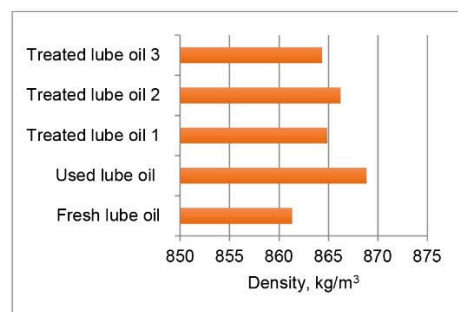
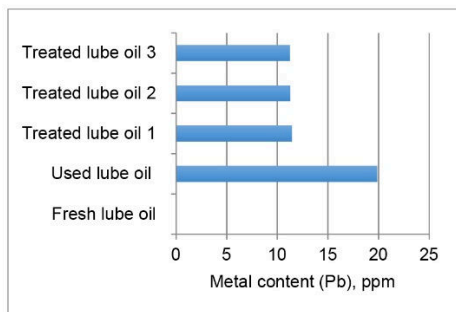
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการสึกกร่อนจากการใช้งาน ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อน ได้แก่ ตะกั่ว เหล็ก และสังกะสี เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้น้ำมันมีจุดเดือด ความหนาแน่นและความหนืดของน้ำมันสูงขึ้น [10] จึงนำน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการบำบัดด้วยกรดอะซิติกที่สภาวะเหมาะสมข้างต้นและดูดซับโลหะหนักด้วยสารดูดซับโดยเปรียบเทียบระหว่างแอคติเวเตดเคลย์กับถ่านกัมมันต์จากผักตบชวาที่ผ่านการเผาและกระตุ้นผิวด้วยโซเดียมคลอไรด์ รูปที่ 3a และ 3b แสดงภาพถ่ายโครงสร้างของผักตบชวาที่กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ ก่อนและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์ที่ได้ปรากฏพื้นผิวที่ขรุขระและมีรูพรุนลักษณะคล้ายรังผึ้งจำนวนมากตามลักษณะโครงสร้างของเส้นใยผักตบชวา และเกิดรูพรุนบนผิวของเส้นใยที่ถูกกระตุ้นด้วยเกลือโซเดียมคลอไรด์ จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะ 211 m²/g ซึ่งมีผลต่อการดูดซับสิ่งเจือปนในน้ำมันหล่อลื่น ผลร้อยละของน้ำมันที่ได้กับสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันหล่อลื่นก่อนและหลังการบำบัด เช่น ความหนาแน่น ความหนืดเชิงจลน์ และดัชนีความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น แสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะโครงสร้างของผักตบชวาที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ (a) ก่อนการเผา และ (b) หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C

ตารางที่ 3 สมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันหล่อลื่นก่อนและหลังการบำบัดด้วยกรดอะซิติกและการดูดซับ

ชนิดน้ำมันหล่อลื่น	ร้อยละผลผลิต	ปริมาณโลหะหนัก (ppm)			ความหนาแน่น (kg/m ³)	ความหนืดเชิงจลน์ (mm ² /s)		ดัชนีความหนืด (VI)
		ตะกั่ว (Pb)	เหล็ก (Fe)	สังกะสี (Zn)		@40 °C	@100 °C	
Fresh lube oil	-	0	1	737	861.35	53.35	9.62	166.81
Used lube oil	-	19.89	12.22	971	868.85	56.56	10.17	169.54
Treated lube oil 1	84.70	11.45	3.14	434	864.90	53.66	10.00	176.13
Treated lube oil 2	72.64	11.27	0.37	416	866.23	53.35	10.00	177.39
Treated lube oil 3	65.75	11.25	0.34	366	864.37	57.42	10.17	166.43



รูปที่ 4 ปริมาณโลหะหนักในน้ำมันหล่อลื่นก่อนและหลังการบำบัด

รูปที่ 5 สมบัติความหนาแน่นและความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นก่อนและหลังการบำบัด

3.2.1 ปริมาณโลหะ (metal content) ใน น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วมีปริมาณโลหะ เช่น ตะกั่ว เหล็ก และสังกะสีเพิ่มขึ้น เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว ดังรูปที่ 4 พบว่าการบำบัดด้วยกรดอะซิติกเพียงอย่างเดียว (treat lube oil 1) สามารถลดปริมาณโลหะหนักทั้งตะกั่ว เหล็ก และสังกะสีได้ 42.4, 74.3 และ 55.3 % ตามลำดับ เมื่อใช้การบำบัดด้วยกรดอะซิติกควบคู่กับการดูดซับด้วยแอคติเวเตดเคลย์ (treat lube oil 2) สามารถลดปริมาณโลหะหนักได้เพิ่มขึ้นอีกเป็น 43.3, 96.9 และ 57.2 % ตามลำดับ และการบำบัดด้วยกรดอะซิติกควบคู่กับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา (treat lube oil 3) สามารถลดปริมาณโลหะหนักได้เพิ่มขึ้นอีกเป็น 43.4, 97.2 และ 62.3 % ตามลำดับ โดยเฉพาะโลหะเหล็กสามารถกำจัดออกได้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม ปริมาณของโลหะสังกะสียังคงเหลืออยู่มากกว่าโลหะชนิดอื่น ทั้งนี้เพราะสังกะสีเป็นองค์ประกอบในสารเติมแต่งที่ใช้กับน้ำมันหล่อลื่น เมื่อน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วสารเติมแต่งจะเสื่อมสภาพลงจำเป็นต้องกำจัดออกไปแล้วเติมใหม่เพื่อทดแทน ทั้งนี้เห็นได้ว่าการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นด้วยกรดอะซิติกและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากผักตบชวานั้นสามารถกำจัดกากตะกอนและลดปริมาณโลหะหนักที่เจือปนอยู่ออกไป

3.2.2 ความหนาแน่น (density) ของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วมีค่าสูงกว่าน้ำมันหล่อลื่นใหม่ เนื่องจากการปนเปื้อนของสิ่งเจือปนต่าง ๆ เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดด้วยกรดและการดูดซับด้วยแอคติเวเตดเคลย์หรือถ่านกัมมันต์จากผักตบชวาสามารถลดความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะของน้ำมันลงได้ ดังรูปที่ 5 แสดงว่าสารจำพวกพอลิเมอร์โมเลกุลใหญ่และสิ่งเจือปนโลหะหนักต่างๆได้ถูกกำจัดออกไป

3.2.3 ความหนืด (viscosity) ของน้ำมันหล่อลื่นเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งในการเลือกใช้

น้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากความแข็งแรงของฟิล์ม น้ำมันหล่อลื่นที่เคลือบอยู่ที่พื้นผิวจะขึ้นอยู่กับความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งจะเห็นว่าน้ำมันหล่อลื่นผ่านการใช้งานที่นำมาทดสอบนี้มีค่าความหนืดเชิงจลน์ที่อุณหภูมิ 40 และ 100 °C สูงกว่าน้ำมันหล่อลื่นใหม่ เช่นเดียวกันกับค่าความหนาแน่น เนื่องจากมีสิ่งเจือปนจากโลหะหนักหรือสารที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อผ่านการบำบัดด้วยกรดแล้วสามารถทำให้ความหนืดเชิงจลน์ลดลงใกล้เคียงกับน้ำมันหล่อลื่นใหม่ แต่การบำบัดด้วยกรดและดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์นั้นทำให้ความหนืดเชิงจลน์เพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะถ่านกัมมันต์มีความละเอียดและน้ำหนักเบาจึงแยกออกได้ค่อนข้างยาก เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความหนืด (viscosity index) ที่มีค่ามากบ่งบอกว่าน้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของน้ำมันหล่อลื่น [4] จากผลการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว พบว่าการบำบัดด้วยกรดเพียงอย่างเดียวจะทำให้น้ำมันมีค่าดัชนีความหนืดสูงขึ้นเช่นเดียวกับการบำบัดด้วยกรดอะซิติกและการดูดซับด้วยแอคติเวเตดเคลย์ ในขณะที่การบำบัดด้วยกรดและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากผักตบชวาสามารถทำให้น้ำมันมีค่าดัชนีความหนืดลดลงใกล้เคียงกับน้ำมันหล่อลื่นใหม่ แสดงดังรูปที่ 5 ทั้งนี้เพราะสารที่ปนเปื้อนโดยเฉพาะสารจำพวกพอลิเมอร์ถูกกำจัดออกไป

4. สรุป

การบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยกรดอะซิติกเข้มข้น สามารถกำจัดสารจำพวกพอลิเมอร์และสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมันหล่อลื่นได้ รวมทั้งสามารถลดปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมัน โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางร่วมกับเทคนิคพื้นผิวดตอบสนองศึกษาสถานะที่เหมาะสมของตัวแปรปริมาณกรด

อะซิติกเข้มข้นต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณกากตะกอนที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับสมการถดถอยกำลังสอง และพบว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการเกิดกากตะกอน ทั้งนี้การกำจัดกากตะกอนออกไปมากจะส่งผลให้สูญเสียปริมาณน้ำมันพื้นฐานมาก แต่หากกำจัดกากตะกอนน้อยเกินไปจะมีผลต่อคุณภาพของน้ำมันที่ผ่านการบำบัด ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณกรดอะซิติกต่อน้ำมันหล่อลื่น 11.2 % โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 45 °C ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที สามารถกำจัดกากตะกอนของสิ่งเจือปนได้ 15.30 % และเมื่อใช้กระบวนการดูดซับร่วมด้วยพบว่า การบำบัดด้วยกรดและดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากผักตบชวาสามารถกำจัดกากตะกอนและลดปริมาณโลหะหนักได้มากกว่าการบำบัดด้วยกรดและดูดซับด้วยแอคติเวเตดเคลย์ โดยมีปริมาณโลหะตะกั่ว เหล็ก และสังกะสีเหลืออยู่ 11.25, 0.34 และ 366 ppm ตามลำดับ และได้ปริมาณน้ำมันพื้นฐาน 65.75 % เมื่อวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันที่ผ่านการบำบัดแล้วมีความหนาแน่นและความหนืดเชิงจลน์ใกล้เคียงกับน้ำมันหล่อลื่นใหม่ อย่างไรก็ตาม กระบวนการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วอาจศึกษาตัวแปรอื่นเพิ่มเติม เช่น เวลาอุณหภูมิ และเวลาในการตกตะกอน รวมทั้งชนิดของสารดูดซับประเภทอื่น ๆ

5. รายการอ้างอิง

- [1] Hamawand, I., Yusaf, T. and Rafat, S., 2013, Recycling of waste engine oils using a new washing agent, *Energies* 6: 1023-1049.
- [2] Udonne, J.D. and Bakare, O.A., 2013, Recycling of used lubricating oils using three sample of acids and clay as a method of treatment, *Int. Arch. App. Sci. Technol.* 4(2): 8-14.
- [3] Udonne, J.D., 2011, A comparative study of recycling of used lubricating oils using distillation, acid and activated charcoal with clay methods, *J. Petroleum Gas Eng.* 2(2): 12-19.
- [4] Eman, A. and Abeer, M., 2011, Re-refining of used lube oil, II- by solvent/clay and acid/clay-percolation processes, *ARPN J. Sci. Technol.* 2: 1034-1041.
- [5] Shri, K.C., Mohan, K.K.S., Sakeer, H.M., Deepa, P.N. and Saravanan, K., 2014, Studies on reuse of re-refined used automotive lubricating oil, *Res. J. Eng. Sci.*, 3(6): 8-14.
- [6] Isah, A.G., Abdulkadir, M., Onifade, K.R., Musa, U., Garba, M.U., Bawa, A.A. and Sani, Y., 2013, Regeneration of used engine oil, *Proceeding of the World Congress on Engineering*, London.
- [7] 911Metallurgist Mineral Processing Engineers, Acid Activated Clay Adsorption Properties, Available Source: <https://www.911metallurgist.com/acid-activated-clays>, December 8, 2016.
- [8] ASTM International, ASTM D 2270 - 93 (Reapproved 1998), Available Source: <http://www.asiajuleh.com/astm/ASTM%20D%202270.pdf>, November 29, 2016.
- [9] Owrang, F., Mattsson, H., Olsson, J. and Pedersen, J., 2004, Investigation of oxidation of a mineral and a synthetic

-
- engine oil, *Thermochimica Acta* 413: 241-248.
- [10] Díaz, R.M., Bernardo, M.I., Fernández, A.M. and Folgueras, M.B., 1996, Prediction of the Viscosity of Lubricating oil Blends at any Temperature, *Fuel* 75: