

การเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติเป็นน้ำมันดิบชีวภาพ

โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิกวิดิแฟคชัน

Conversion of Natural Rubber Product to Bio-Crude Oil

By Hydrothermal Liquefaction Process

วิลักษณ์นาม ผลเจริญ กุลเชษฐ เพียรทอง*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

85 ถนนสถลมารค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Viluknam Phoncharoen Kulachet Pianthong*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University,

85 Satholmark Road, Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani 34190, Thailand

*Corresponding author Email: kulachate.p@ubu.ac.th

(Received: April 11, 2024; Revised: April 26, 2024 ; Accepted: May 10, 2024)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ ได้แก่ ยางแผ่นดิบ ยางก้อนถ้วย และน้ำยางพารา ไปเป็นน้ำมันดิบชีวภาพด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิกวิดิแฟคชัน โดยใช้อุณหภูมิของปฏิกิริยาในช่วง 350 °C และ 375 °C ทำละลายด้วยน้ำในอัตราส่วนมวลต่ออย่างพารา 2:1, 3:1 และ 4:1 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ผลการทดลองพบว่าได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 71.40% จากการใช้ยางแผ่นดิบเป็นวัตถุดิบ ส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพจากยางก้อนถ้วย และจากน้ำยางพาราได้ 70.03% และ 22.47% ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีค่าพีการดูดซับแสงที่ $2,920\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงกลุ่มฟังก์ชันอัลเคน (C-H) มีความเข้มข้นค่อนข้างสูงซึ่งแสดงคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิง การศึกษานี้แสดงถึงความเป็นไปได้ทางเทคนิคในการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพ จากยางธรรมชาติในประเทศไทยด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิกวิดิแฟคชัน และอาจเป็นพลังงานทางเลือกในอนาคตที่ช่วยลดส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากยางพาราได้อีกด้วย

คำสำคัญ: ไฮโดรเทอร์มัลลิกวิดิแฟคชัน น้ำมันดิบชีวภาพ ยางธรรมชาติ น้ำยางพารา

ABSTRACT

This research investigates the conversion yield of natural rubber product such as raw rubber sheets, cup lumps, and Para rubber latex to bio-crude oil by hydrothermal liquefaction process. The reaction temperatures are in the ranges of 350 °C and 375 °C. The materials are dissolved in water at H₂O/NR mass ratios of 2:1, 3:1, and 4:1. The reaction time was 60 minutes. Results show that the highest yields of bio-crude oil is 71.40% by using raw rubber sheets as raw material, while the bio-crude oil yield from using cup lumps, and Para rubber latex are 70.03% and 22.47% respectively. The Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) analysis shows peak absorbance at $2,920\text{ cm}^{-1}$, indicating the intensity of the absorbance of the alkane functional group (C-H) which indicates fuel oil property. This

study shows the technical possibility of producing bio-crude oil from natural rubber in Thailand by using the hydrothermal liquefaction process. This might be the alternative energy in the future and support the beneficial of using Para rubber as well.

Keyword: Hydrothermal liquefaction, bio-crude oil, natural rubber, para rubber latex.

1. บทนำ

เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพและมีความสำคัญในการนำมาทดแทนการใช้เชื้อเพลิงที่มาจากปิโตรเลียม ซึ่งมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางทั้งในรูปแบบเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว หรือก๊าซ ที่มีการผลิตจากชีวมวล [1] ความสำคัญที่โดดเด่นของเชื้อเพลิงชีวภาพคือมีคุณสมบัติที่ส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนในการแทนที่เชื้อเพลิงที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) สูง [2], [3] ในปัจจุบันนักวิจัยได้มีการศึกษาเทคนิคหลายรูปแบบ นำมาใช้ในการเปลี่ยนแปลงชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว ไพโรไลซิสก็เป็นกระบวนการย่อยสลายพันธะเคมี และเป็นเทคนิคหนึ่งที่เหมาะนำมาใช้ในการเปลี่ยนชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเหลว ในการทำไพโรไลซินั้นจะใช้วิธีการให้ความร้อนกับวัตถุดิบชีวมวล ที่จำเป็นต้องทำให้แห้งก่อนเพื่อทำการเปลี่ยนผ่านได้โดยตรงเป็น ชินแก๊ส และเชื้อเพลิงเหลว [4]

เชื้อเพลิงชีวภาพส่วนใหญ่ในปัจจุบันมาจากเมล็ดพืช น้ำมัน เนื้อผลไม้ และมาจากน้ำมันที่สามารถใช้บริโภคได้ แหล่งน้ำมันเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความต้องการด้านโภชนาการของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับความต้องการอาหารที่เพิ่มขึ้นทั่วโลก [5] ที่ผ่านมามีการรณรงค์เรื่องเชื้อเพลิงชีวภาพจากแหล่งใหม่เพิ่มขึ้น งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้แหล่งที่มาของวัตถุดิบที่ไม่สามารถบริโภคได้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนแหล่งที่มาของวัตถุดิบได้ [6] ประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้ผลิตยางธรรมชาติ (Natural Rubber: NR) ชั้นนำของโลก โดยมีพื้นที่ปลูกยางพาราประมาณ 20 ล้านไร่ และมีผลิตภัณฑ์จากต้นยางพาราที่

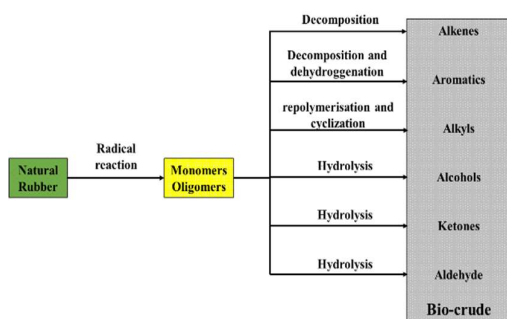
หลากหลาย เช่น น้ำยาง เมล็ดยาง ยางก้อน ยางแผ่น และลำต้นของยางพารา

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิเดชัน (Hydrothermal Liquefaction: HTL) ที่สามารถเปลี่ยนชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเหลว เป็นการศึกษาที่น่าสนใจ เพราะไม่ต้องทำวัตถุดิบให้แห้งก่อน มีการใช้อุณหภูมิทำงานที่ต่ำกว่ากระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการทางเคมีโดยใช้ช่วงความดันสูง และอุณหภูมิในสภาพของน้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤต (ใกล้ 374 °C และ 22 MPa) เพื่อทำลายและปรับปรุงโครงสร้างพอลิเมอร์ชีวภาพของชีวมวลเป็นของเหลว หรือที่เรียกต่อไปใหม่ว่า น้ำมันดิบชีวภาพ (Bio-Crude Oil: BCO) สามารถผสมกับเชื้อเพลิงอื่นเพื่อการเผาไหม้หรือสามารถปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้เป็นเชื้อเพลิงของเหลวที่เทียบเท่ากับเชื้อเพลิงปิโตรเลียมได้ [7]

ยางธรรมชาติ (NR) ถือเป็นหนึ่งในวัสดุอินทรีย์ชีวภาพที่สำคัญ ซึ่งประกอบด้วยโพลี-ไอโซพรีนเป็นหลัก ในระหว่างกระบวนการทางเคมี พอลิเมอร์ และยางธรรมชาติจะถูกย่อยสลายผ่านกระบวนการแตกตัวของโมเลกุล นำไปสู่การสร้างโมเลกุลที่มีความไม่เสถียรซึ่งเมื่อถูกแยกออกจากกันและไปรวมกลุ่มกันใหม่ เกิดเป็นโมเลกุลใหม่ที่มีความเข้ากันได้ พร้อมกับการลดขนาดลง กระบวนการนี้ผ่านการเปลี่ยนแปลงทางเคมีทั้งการไฮโดรจิเนชันและพอลิเมอริเซชัน จนได้สารประกอบใหม่ที่มีประโยชน์ในการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพ [8], [9]

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิเดชัน เริ่มต้นในเครื่องปฏิกรณ์จากการที่โมเลกุลในของเหลวละลาย และเริ่มต้นการเชื่อมโยงใหม่ในพอลิเมอร์ โดยโมโนเมอร์ถูกสร้างขึ้นผ่านกระบวนการเคมีที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงในโครงสร้างโมเลกุล สารประกอบเหล่านี้จะผ่าน

กระบวนการอัลคิเลชันสร้างสารประกอบที่มีในกลุ่มของอัลเคน และอัลคิลที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่กระบวนการเตโชโตรเจนชั้นของสารประกอบอัลคีนนำไปสู่การเกิดไฮโดรคาร์บอน และสารประกอบอะโรมาติก นอกจากนี้ยังมีการสร้างกลุ่มฟังก์ชันอื่นๆ เช่น แอลกอฮอล์ คีโตน และอัลเดไฮด์ ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส [10] ดังที่นำเสนอในรูปที่ 1 แสดงถึงกลไกของการย่อยสลายพันธะเคมียางธรรมชาติในการสร้างกลุ่มฟังก์ชันของน้ำมันดิบชีวภาพ



รูปที่ 1 กระบวนการของยางธรรมชาติเป็นน้ำมันดิบชีวภาพ

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์จากต้นยางพารา เช่น การศึกษาการใช้เปลือกเมล็ดยางเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่าน [11] การสกัดไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดยางพาราซึ่งมีการศึกษาเป็นจำนวนมาก [12], [13] ที่ผ่านมานักวิจัยได้ใช้เศษยางรถยนต์ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตจากยางธรรมชาติในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟชันพบว่าค่าความร้อนของน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้มีค่ามากกว่าการใช้วัตถุดิบจากชีวมวล และใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังเป็นโพลีเมอร์อินทรีย์ที่มีสารประกอบของไอโซพรีน โพลีไอโซพรีน และสารประกอบอื่นๆ รวมถึงใช้น้ำเป็นตัวทำละลายในอัตราส่วนต่อวัตถุดิบยางธรรมชาติ 2:1, 3:1 และ 4:1 จะส่งเสริมให้มี นิวคลีโอไฟล์ (nucleophile) ซึ่งคือโมเลกุลหรือสารที่ขาดอิเล็กตรอน ดังนั้นจะมีแนวโน้มที่จะดึงดูดเพื่อทำพันธะกับโมเลกุลหรือสารที่มีอิเล็กตรอนเกิน (electrophiles) จึงเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาการใช้

ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติจากต้นยางพารา ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟชัน [10], [14], [15] ในส่วนของน้ำยางพาราซึ่งเป็นของเหลวสีน้ำตาลที่ได้มาจากการกรีดลำต้น จากการศึกษาพบว่าน้ำยางพาราประกอบด้วยอนุภาคไฮโดรคาร์บอนประมาณ 25 ถึง 45% โดยน้ำหนักที่กระจายตัวอยู่ [16], [17] รวมทั้งยางก้อนถ้วย ยางแผ่นดิบ ก็คือผลที่เกิดจากการแห้งตัวของน้ำยางสด ซึ่งถือว่ามีส่วนประกอบที่สำคัญในการเปลี่ยนผ่านเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพได้ รวมถึงการวิจัยเกี่ยวกับไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟชันของผลิตภัณฑ์จากยางพารายังมีอยู่น้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวทางการศึกษาการใช้วัตถุดิบจากยางธรรมชาติ ซึ่งคือผลผลิตจากต้นยางพาราที่ปลูกได้ในประเทศ นำเข้าสู่การใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟชัน ด้วยสภาวะอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ที่กำหนด เพื่อศึกษาผลลัพธ์ผลิตภัณฑ์ของการเปลี่ยนเป็นน้ำมันดิบชีวภาพโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายในอัตราส่วนโดยมวลที่ต่างกัน

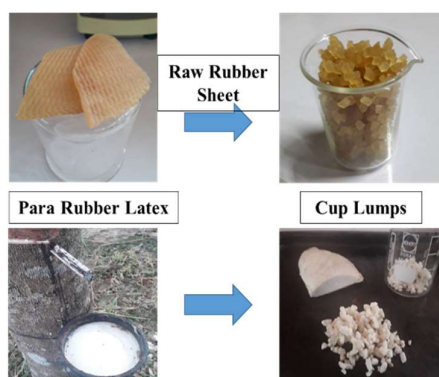
2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบในการทดลองมี 3 ชนิดได้แก่ น้ำยางพารา (Para rubber latex) ยางก้อนถ้วย (Cup lumps) และยางแผ่นดิบ (Raw rubber sheet) ที่ใช้ในการศึกษางานวิจัยนี้ นำมาจากตำบลโนนสมบูรณ์, อำเภอเดชอุดม, จังหวัดอุบลราชธานี ต้นยางพาราของกลุ่มนี้เป็นสายพันธุ์ยางชนิด PRIM 600 ซึ่งเป็นสายพันธุ์หลังนิยมปลูกในประเทศไทย

น้ำยางพาราได้จากการกรีดยางในช่วงเช้ามืดให้ไหลมารวบรวมในถ้วย และทำการผสมสารแอมโมเนีย (0.30%) เล็กน้อยช่วยป้องกันการแข็งตัว ส่วนยางก้อนถ้วยได้จากน้ำยางพาราไหลลงสู่ถ้วยรองรับ รอให้แข็งตัวประมาณ 12-24 ชั่วโมง จากนั้นเก็บก้อนยางที่แข็งแล้วมาทำความสะอาด ในส่วนของยางแผ่นดิบมีขั้นตอนการเตรียมเริ่มจากกรองน้ำยางพาราให้สะอาดและผสมกับน้ำสะอาด ในอัตราส่วนน้ำยางพาราต่อน้ำสะอาด 3:2 ส่วน

จากนั้นผสมน้ำกรดฟอร์มิกที่เจือจาง (อัตราส่วนน้ำกรดต่อ น้ำ 1:40 ส่วน) เพื่อให้ให้น้ำยางพาราแข็งตัว กวนจนเนื้อยาง จับตัว และตักฟองอากาศออก เมื่อยางแข็งตัวดีแล้วจะ นำไปรีนน้ำและนวดบนแท่นให้บาง หลังจากนั้นนำเข้า เครื่องรีดเรียบ รีดดอกสุดท้ายล้างน้ำและผึ่งในที่ร่มจนแห้ง ทั้งยางแผ่นดิบ และยางก้อนถ้วยเมื่อแข็งตัวแล้วทำการตัด เป็นชิ้นเล็กขนาดประมาณ 3-5 mm ก่อนทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วัตถุดิบในการทดลอง

2.2 อุปกรณ์การทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการการใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์ มัลลิคิตแพคชั่นในเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำจาก Ni-alloy ชนิด ไม่มีใบกวนวัตถุดิบ ขนาดความจุ 100 mL (รุ่น: CY-100x) ในตัวเครื่องมีขดลวดความร้อนขนาด 3 kW สามารถทำ ความร้อนในอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 10 °C/min เซ็นเซอร์วัดความดัน ซึ่งใช้สำหรับตรวจสอบความดันเกิน ที่แรงดันสูงสุด 15 MPa ถึงจะมีการปล่อยแรงดันออกด้วย เซฟตี้วาล์วเพื่อความปลอดภัย รายละเอียดของเครื่อง ปฏิกรณ์ และอุปกรณ์ประกอบที่เกี่ยวข้องแสดงในรูปที่ 3

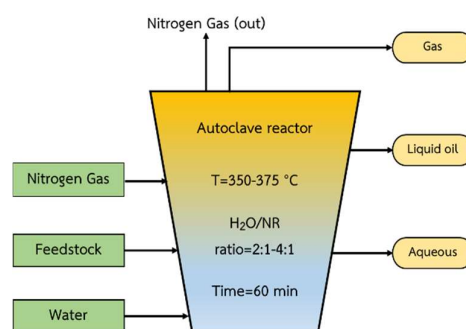
2.3 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองคือ นำน้ำยางพารา ยางก้อนถ้วย และยางแผ่นดิบจากการจัดเตรียมข้างต้นทำการชั่งน้ำหนัก เริ่มต้น ในการทดลองใช้ตัวทำละลายด้วยน้ำในอัตราส่วน ต่อวัตถุดิบยางพารา 2:1, 3:1 และ 4:1 โดยน้ำหนักดังนี้ น้ำยางพารา ตัวทำละลาย:วัตถุดิบ ที่อัตราส่วน 2:1 (20

g:10 g), 3:1 (30 g:10 g) และ 4:1 (40 g:10 g) ยางก้อน ถ้วย ตัวทำละลาย:วัตถุดิบ ที่อัตราส่วน 2:1 (10 g:5 g), 3:1 (15 g:5 g) และ 4:1 (20 g:5 g) ยางแผ่นดิบ ตัวทำ ละลาย:วัตถุดิบ ที่อัตราส่วน 2:1 (10 g:5 g), 3:1 (15 g:5 g) และ 4:1 (20 g:5 g) ขั้นตอนในการทดลองแต่ละ เงื่อนไขคือ นำวัตถุดิบในการทดลองใส่ลงไปในถังปฏิกรณ์ จากนั้นทำการปิดถังปฏิกรณ์ และปล่อยก๊าซไนโตรเจน (N₂) ที่ความดัน 2 bar เพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในถัง ปฏิกรณ์ออกเป็นระยะเวลา 5 นาที จากนั้นปิดวาล์ว เปิด เครื่องเริ่มให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ถึง อุณหภูมิที่กำหนดไว้ที่ 350 °C และ 375 °C และคง สภาวะการทำปฏิกิริยาตามระยะเวลาที่ 60 min ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4



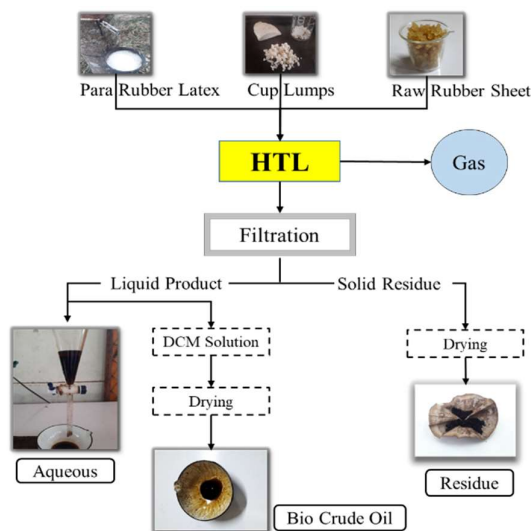
รูปที่ 3 เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัลลิคิตแพคชั่น



รูปที่ 4 แสดงกระบวนการทดลอง

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจะทำการลดอุณหภูมิถึงปฏิกิริยาโดยการระบายความร้อนกับอากาศตามธรรมชาติในระดับหนึ่ง และนำมาวางที่อ่างน้ำอุณหภูมิระดับห้องทำการเปิดวาล์ว V2 เพื่อระบายแก๊สในระบบ และเปิดฝา จากนั้นจึงนำของผสมที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟคชันที่อยู่ภายในออกมาจากถังปฏิกิริยา

เพื่อแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง และของเหลว (น้ำ และสารละลายอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้) ให้กลายเป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำด้วยการผสมกับไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane: DCM) ให้แยกจากกันด้วยกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 5 สำหรับในส่วนของแข็งและของเหลวผลิตภัณฑ์จะนำไปผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 12 ชั่วโมง และในขั้นตอนสุดท้ายจะนำตัวอย่างทั้งหมดไปชั่งน้ำหนักพร้อมทั้งวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนกระบวนการแยกผลิตภัณฑ์

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

วัตถุดิบจากยางธรรมชาติได้รับการวิเคราะห์คุณสมบัติต่อไปนี การวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นฐานของวัตถุดิบ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ CHNS/O รุ่น 2400 ได้แก่ วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ หรือ Proximate analysis

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของวัตถุดิบ หรือ Ultimate analysis สำหรับการวิเคราะห์เบื้องต้นของวัตถุดิบ ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) และความชื้น (Moisture content) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D3175 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D3172 ปริมาณเถ้า (Ash) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D3174 และค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value: HHV) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D240 โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ยางธรรมชาติได้รับการวิเคราะห์ Thermogravimetric analysis (TGA) โดยใช้เครื่อง Rigaku Thermo Plus 2 TG-DTA TG 8120 ได้ดำเนินการที่อัตราการเพิ่มความร้อน 10 °C/min กับตัวอย่างยางก้อนถ้วยน้ำหนัก 4.90 mg และตัวอย่างยางแผ่นดิบน้ำหนัก 2.80 mg การวิเคราะห์ที่ได้ดำเนินการในช่วงอุณหภูมิ 28 °C ถึง 800 °C ในบรรยากาศที่ถูกปกคลุมด้วยไนโตรเจน อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ในการทดสอบคือ 20 mL/min

ในส่วนของเหลวผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟคชันในเครื่องปฏิกิริยาแล้ว และขั้นตอนการแยกของแข็งจากตะกอนออกจากของเหลว ผ่านการอบความร้อนแล้ว จะนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ของน้ำมันดิบชีวภาพ ดังสมการที่ 1

$$\text{Bio - oil yield (\%)} = \frac{W_{\text{Bio - oil}}}{W_{\text{Biomass.db}}} \times 100\% \quad (1)$$

ของเหลวผลิตภัณฑ์ (bio crude oil) ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล วิเคราะห์หาโครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุล โดยอาศัยหลักการของการดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรด ซึ่งลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะ ทำให้ทราบลักษณะฟังก์ชันกรุปของโมเลกุลของตัวอย่างของเหลวผลิตภัณฑ์

3. ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการใช้วัตถุดิบของยางพาราในประเทศมีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ผ่านเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟชันด้วยเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูงด้วยอุณหภูมิที่กำหนดไว้ที่ 350 °C และ 375 °C และคงสถานะการทำปฏิกิริยาตามระยะเวลาที่ 60 min เพื่อศึกษาผลผลิตน้ำมันดิบชีวภาพด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของน้ำมันดิบชีวภาพ และนำผลิตภัณฑ์ของเหลวไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันสารอินทรีย์ด้วยด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

3.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติวัตถุดิบ

ในตารางที่ 1 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ หรือ Proximate analysis พบว่ายางก้อนถ้วย แผ่นยางดิบ มีปริมาณสารระเหย (Volatile matter) สูง 79.87% และ 98.83% ตามลำดับ บ่งบอกถึงค่าพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักที่มาก เป็นเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูง ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) 0.01% และ 0.06% ตามลำดับ ปริมาณเถ้า (Ash) 0.38% และ 0.18% ตามลำดับ และความชื้น (Moisture content) 19.74% และ 0.93%

ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของวัตถุดิบ หรือ Ultimate analysis พบว่ายางก้อนถ้วย และแผ่นยางดิบ มีปริมาณคาร์บอน (C) สูง 71.84% และ 85.46% ตามลำดับ ส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นพลังงานสูง ปริมาณไฮโดรเจน (H) 11.49% และ 10.92% ปริมาณไนโตรเจน (N) 0.13%, 0.37% ออกซิเจน (O) 16.37%, 3.22% และปริมาณซัลเฟอร์ (S) 0.17%, 0.03%

ในการศึกษานี้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัตถุดิบยางพารา โดยอาศัยคุณสมบัติเชิงอุณหภูมิกความร้อน Thermogravimetric analysis (TGA) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน การลดลงของมวลที่เกิดขึ้นใน

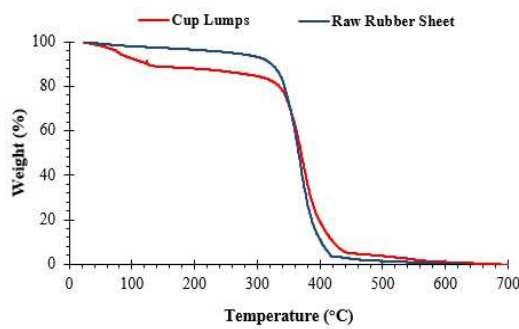
งานวิจัยนี้ เป็นผลมาจากการสลายตัวทางความร้อนและกระบวนการ devolatilization ของตัวอย่างวัตถุดิบ

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นฐาน

Characteristic	Cup lumps	Raw rubber sheet
Proximate analysis (wt%)		
Volatile matter	79.87	98.83
Fixed carbon	0.01	0.06
Ash	0.38	0.18
Moisture	19.74	0.93
Ultimate analysis (wt%)		
Carbon	71.84	85.46
Hydrogen	11.49	10.92
Nitrogen	0.13	0.37
Oxygen**	16.37	3.22
Sulfur	0.17	0.03
* CHN: Application note No. 203-821-485 According to the LECO method., S: Application note No. 203-821-466 According to the LECO method. **Calculated by difference.		

ยางแผ่นดิบ (Raw rubber sheet) ได้จากการแยกในส่วนหนึ่งของเนื้อยางของน้ำยางพารา และยางก้อนถ้วย (Cup lumps) ที่ได้จากการแข็งตัวของน้ำยางพารา น้ำยางพารา (Para rubber latex) ทางผู้วิจัยถือได้ว่าเป็นวัตถุดิบที่มีความใกล้เคียงกัน (หากทำการแยกในส่วนของเนื้อยาง) และจากผลการศึกษาที่ผ่านมา น้ำยางพารามีส่วนที่เป็นเนื้อยาง 35% ส่วนที่ไม่ใช่ยาง 65% ซึ่งอยู่ในรูปของน้ำหรือที่เรียกว่าซีรัม (serum) ส่วนของลุดดอยด์ และสารอื่นหรือที่เรียกว่า อนุภาคเฟรยวีสลิง (frey wysling) จากรูปที่ 6 แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่าง พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมแกรมมีเพียงขั้นตอนเดียว อยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 350 °C ถึง 400 °C มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักตัวอย่างสูญเสียมากกว่า 50-90% เป็น

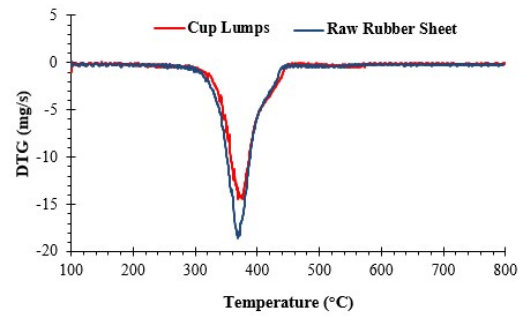
ที่มาของการเลือกช่วงอุณหภูมิที่กำหนดในการทำปฏิกิริยาของชุดปฏิกรณ์



รูปที่ 6 การสูญเสียน้ำหนักเชิงอุณหภูมิความร้อน

อีกผลการทดสอบที่ช่วยเพิ่มความถูกต้องแม่นยำในการตรวจวัด และให้ข้อมูลการวิเคราะห์ในแง่จลนพลศาสตร์ ณ อุณหภูมิต่างๆได้เป็นอย่างดี เทคนิคนี้เรียกว่า “เดริเวทีฟ เทอโมกราวิเมตริก อะนาไลซิส” (Derivative Thermogravimetric Analysis: DTG) ซึ่งคือการพล็อตกราฟอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลาเหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊ส หรือการระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition)

รูปที่ 7 แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่าง ยางแผ่นดิบ (Raw rubber sheet) และยางก้อนถ้วย (Cup lumps) ที่ได้จากการแข็งตัวของน้ำยางพารา สามารถสังเกตได้ในจุดยอดของจากกราฟ DTG ซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราการสูญเสียมวลมากที่สุด หรือเรียกได้ว่าเป็นจุดที่มีพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน และกระบวนการ devolatilization จุดสูงสุดของแผ่นยางดิบ และยางก้อนถ้วยที่อุณหภูมิ 372.5.9 °C และ 381.7 °C และมีอัตราการลดลงของมวลอยู่ที่ -18.20 mg/s และ -14.5 mg/s ซึ่งในระหว่างกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย ส่งผลแสดงเทอร์โมแกรมดังกล่าว

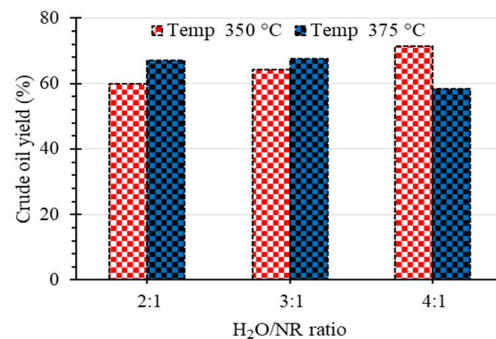


รูปที่ 7 อัตราการการสูญเสียมวล

3.2 ผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพ

จากการทำกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟคชันยางแผ่นดิบ ส่งผลให้มีความดันที่ในชุดปฏิกรณ์ 7, 8 และ 9 MPa ตามลำดับ อุณหภูมิและเวลาถูกกำหนดไว้ที่ 350 °C, 375 °C และ 60 min

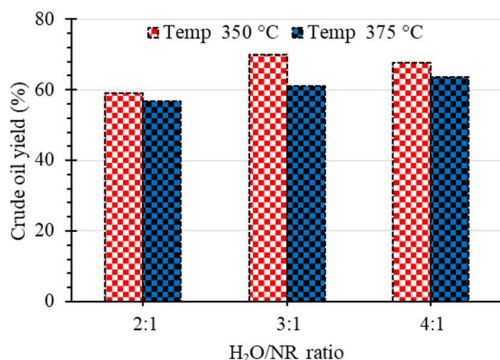
พบว่ามีการเพิ่มปริมาณน้ำมันดิบชีวภาพเป็นสัดส่วนของน้ำที่เพิ่มขึ้นจาก 2:1, 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพสูงสุดที่ 71.40% ด้วยอัตราส่วนมวลของ H₂O/NR ที่ 4:1 และ เวลา 60 min ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพจากแผ่นยางดิบ

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟคชันของยางก้อนถ้วยในการศึกษาครั้งนี้ ผลกระทบจากอัตราส่วนมวลของ H₂O/NR ที่อัตราส่วน 2:1, 3:1, และ 4:1 ด้วยความดันที่เกิดขึ้นในชุดปฏิกรณ์ 7, 8 และ 9 MPa ตามลำดับ อุณหภูมิและเวลาถูกกำหนดไว้ที่ 350 °C, 375 °C และ 60 min ตามลำดับพบว่ามีการเพิ่มปริมาณน้ำมันดิบ

ชีวภาพ เมื่อสัดส่วนของน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกัน ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพสูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ 70.3% ด้วยอัตราส่วนมวลของ H_2O/NR 3:1 และเวลา 60 min ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 9

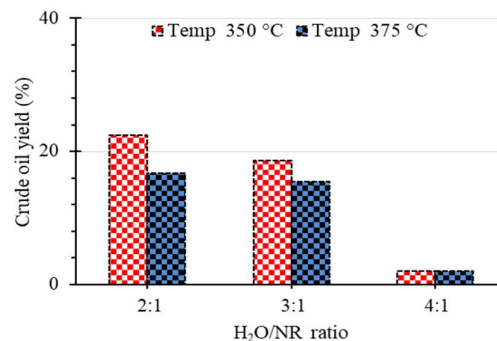


รูปที่ 9 ผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพจากยางก้อนถ้วย

การทดลองทั้งหมดอยู่ในช่วงความดัน และอุณหภูมิของน้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤต แสดงให้เห็นว่าผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 °C ในกระบวนการดีพอลิเมอไรเซชัน หรือการสลายพอลิเมอร์เป็นผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือการสลายพอลิเมอร์สามารถทำปฏิกิริยาแปลงเป็นผลิตภัณฑ์อื่น สอดคล้องกับช่วงการสลายตัวทางความร้อน (TGA) สัดส่วนของน้ำที่มีอยู่ในกระบวนการสามารถมีพฤติกรรมเป็นนิวคลีโอไฟล์ได้ อัตราส่วน H_2O/NR เพิ่มขึ้นนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของนิวคลีโอไฟล์ [18] ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการทำลายโครงสร้างของแกนหลักพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์และนำไปสู่ผลผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สูงขึ้น

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟคชันของน้ำยางพารา ในการศึกษาชิ้นนี้สนใจอัตราส่วนมวลของน้ำกับน้ำยางพารา (H_2O/NR) 2:1, 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ อุณหภูมิระดับ 350 °C และ 375 °C ระยะเวลา 60 min รูปที่ 10 แสดงให้เห็นปริมาณผลลัพธ์สูงสุด 22.47% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 350 °C อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราส่วนมวลของน้ำที่มากขึ้นรวมกับน้ำยางพารา ส่งผล

กระทบที่สำคัญต่อความดันอยู่ในถังปฏิกรณ์ เนื่องจากอุณหภูมิและความดันสูงถึงขีดจำกัดสูงสุด (15 MPa) เซฟตี้วาล์วมีการปล่อยแรงดันออกด้วยเพื่อความปลอดภัย



รูปที่ 10 ผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพจากน้ำยาง

ดังนั้นการทดลองไม่สามารถดำเนินการในช่วงความดันสูงกว่านี้ได้จึงมีผลลัพธ์ที่หลงเหลือบางส่วน เมื่อนำไปแยกผลิตภัณฑ์ได้ปริมาณผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพ 2.2% ในส่วนการทดลองนี้ถือว่าไม่สมบูรณ์ เนื่องจากตัวอย่างการทดลองมีการรั่วไหลออกไปดังที่กล่าว

3.3 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันดิบชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์ธาตุของน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟคชันวัตถุดิบของยางพาราดังแสดงในตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์น้ำมันดิบชีวภาพมีปริมาณคาร์บอน และไฮโดรเจนสูง ตามลำดับคือ 85.10% และ 11.08% สำหรับยางแผ่นดิบ 84.51% และ 11.06% สำหรับยางก้อนถ้วย และ 82.72% และ 11.58% สำหรับน้ำยางพารา ปริมาณคาร์บอน และไฮโดรเจนที่สูงส่งผลต่อค่าพลังงานที่สูง ในขณะที่เดียวกันปริมาณออกซิเจนที่สูงมีผลต่อการลดค่าพลังงาน จากรายงานที่ผ่านมาผลปริมาณซัลเฟอร์ที่ต่ำทำให้คุณสมบัติของยางพาราเหมาะสม และน่าเชื่อถือสำหรับการอัพเกรดการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงชนิดเหลวได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากมีการได้รับการเข้าสู่กระบวนการทางปิโตรเลียมต่อไป [19] ค่า HHV ของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพทั้ง 3 วัตถุดิบ อยู่ในช่วง 42.41–43.78 MJ/kg ค่า

ความร้อนสูงของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิเดชันของวัตถุดิบจากยางพารา มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดิบจากแหล่งปิโตรเลียม [20]

ตารางที่ 2 คุณสมบัติผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพ

Characteristic	Raw rubber sheet	Cup lumps	Para rubber latex
Elemental Analysis (wt%)			
Carbon	85.10	84.51	82.72
Hydrogen	11.08	11.06	11.58
Nitrogen	0.30	0.33	0.12
Sulfur	0.06	0.05	0.24
Oxygen**	3.46	4.05	5.30
HHV (MJ/kg)	43.78	43.51	42.41
* CHN: Application note No. 203-821-485 According to the LECO method., S: Application note No. 203-821-466 According to the LECO method. **Calculated by difference.			

3.4 ผลวิเคราะห์ FT-IR น้ำมันดิบชีวภาพ

การดูดซับแสง (Absorbance) คือการวัดที่ใช้วิธีการเทียบความทึบแสง (Spectrophotometry) กำหนดปริมาณพลังงานรังสีที่สารดูดซับในความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกันของการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR วิธีการนี้มีประสิทธิภาพสำหรับการกำหนดตัวตนของวัตถุดิบที่ไม่ทราบ เช่นเดียวกับการกำหนดความเข้มข้นของสารในตัวอย่าง โดยอ้างอิงค่าความยาวคลื่นแสงมาตรฐาน การเพิ่มขึ้นของค่าการดูดซับที่แสดงบนกราฟบ่งบอกถึงความเข้มข้นของสารที่ดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น

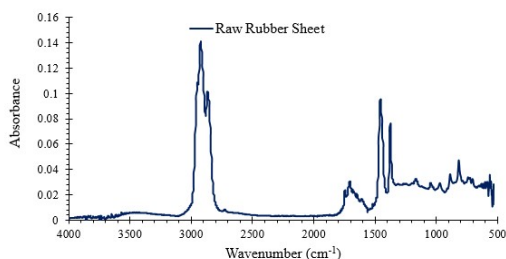
ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของน้ำมันดิบชีวภาพแสดงกราฟสเปกตรัมดูดซับที่ส่งผ่านความถี่ของแสงอินฟราเรดผ่านตัวอย่างของน้ำมันดิบชีวภาพจากวัตถุดิบ 3 ชนิด ได้แก่ แผ่นยางดิบ ยางก้อนถ้วย และน้ำยางพารา ดังรูปที่

11-13 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางเคมีของสารตัวอย่างได้อย่างชัดเจน แกน Y ของกราฟแสดงการดูดซับของสาร แกน X แสดงค่าความยาวคลื่นของแสงที่ส่งผ่าน โดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่นที่สำคัญ พบว่าการดูดซับของกลุ่มฟังก์ชัน C-H ระหว่าง $2,710\text{ cm}^{-1}$ ถึง $3,040\text{ cm}^{-1}$ คือช่วงพันธะทางเคมีเดี่ยว (Single Bond) และช่วงสเปกตรัมลายนิ้วมือ (fingerprint region) คลื่นแสงต่ำกว่า $1,500\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะเคมีอะโรมาติก โดยการวิเคราะห์ค่าการดูดซับ (Absorbance) เพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อความยาวคลื่นลดลง จุดพีคค่าการดูดซับเกิดขึ้นที่ $2,920\text{ cm}^{-1}$ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตารางลักษณะฟังก์ชันกรุป (Characteristic IR Absorption Peaks) แสดงถึงความเข้มข้นของพันธะเคมีหมู่ฟังก์ชันอัลเคน (C-H) มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นการดูดกลืนแสง มีลักษณะการสั่นที่ยึดตัวแบบไม่สมมาตรระดับการสั่นสะเทือนปานกลางไปถึงระดับมาก (Vibration Asymmetrical Stretch m to s) ดังนั้นค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นนี้ แสดงถึงความเข้มข้นค่อนข้างสูงในตัวอย่างน้ำมันดิบชีวภาพ ผลการวิเคราะห์ FT-IR ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันดิบชีวภาพที่สอดคล้องกัน แม้มาจากผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันของยางธรรมชาติ

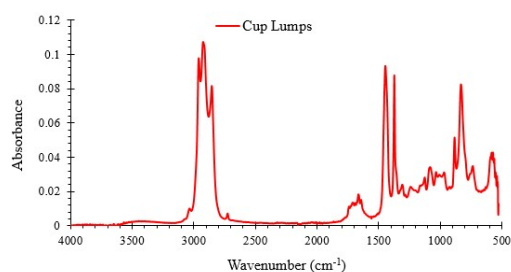
3.5 ต้นทุนการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพ

ต้นทุนการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพซึ่งในการศึกษานี้จะอยู่ในรูปของ Lab scale ของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดความจุ 100 mL จะแบ่งเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตกับผลการทดลองที่ได้ปริมาณน้ำมันดิบชีวภาพสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 3 ผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพสูงสุดที่ 71.40% จากแผ่นยางดิบ ต้นทุนรวมเท่ากับ 28.99 บาท ผลลัพธ์ 70.03% จากยางก้อนถ้วย ต้นทุนรวมเท่ากับ 28.98 บาท ผลลัพธ์สูงสุด 22.47% จากน้ำยางพาราดิบ ต้นทุนรวมเท่ากับ 29.01 บาท การศึกษานี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในทางเทคนิค ดังนั้นต้นทุนในการผลิตก็จะสูง

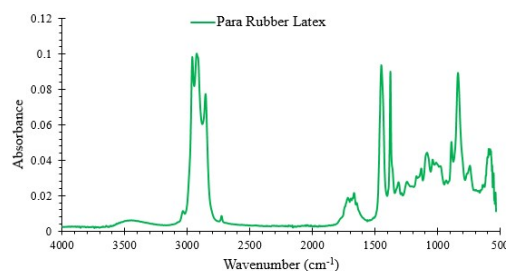
มาก นอกจากนี้ในอนาคตหากกระบวนการผลิตได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมให้ผลิตแบบต่อเนื่อง และใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง



รูปที่ 11 ผล FT-IR น้ำมันดิบชีวภาพจากแผ่นยางดิบ



รูปที่ 12 ผล FTIR น้ำมันดิบชีวภาพจากยางก้อนถ้วย



รูปที่ 13 ผล FTIR น้ำมันดิบชีวภาพจากน้ำยางพารา

4. สรุปผล

กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิกวิดแฟคชันของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ภายในถังปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่กำหนด และคงสภาวะการทำปฏิกิริยาตามระยะเวลาที่ 60 min สรุปผลการทดลองได้ดังนี้ ตารางที่ 3 ต้นทุนผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพ

รายการ	Raw rubber sheet (5 g)	Cup lumps (5 g)	Para rubber latex (10 g)
ราคาพลังงานไฟฟ้า 1.5 kWh* (บาท)	6.27	6.27	6.27
ราคาสารเคมี 100 mL (บาท)	22.50	22.50	22.50
ราคาวัตถุดิบ**	0.22	0.21	0.24
ราคารวม: ผลลัพธ์สูงสุด (บาท)	28.99	28.98	29.01
BCO/g (บาท)	8.12	8.28	12.95

*อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า 4.18 บาท/หน่วย
** ราคาวัตถุดิบยางพารา 2566

ผลวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงอุณหภูมิความร้อนของ ยางแผ่นดิบ และยางก้อนถ้วย ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 350 °C ถึง 375 °C มีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า 50-90% ผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพสูงสุดที่ 71.40% ที่อัตราส่วนมวลของ H₂O/NR 4:1 จากยางแผ่นดิบ ผลลัพธ์ 70.03% ที่อัตราส่วนมวลของ H₂O/NR 3:1 จากยางก้อนถ้วย ผลลัพธ์สูงสุด 22.47% จากน้ำยางพารา อัตราส่วนมวลของ H₂O/NR 2:1 อุณหภูมิ 350 °C ระยะเวลา 60 min เมื่อพิจารณาความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นน้ำมันดิบชีวภาพ ยางก้อนถ้วยถือว่าเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพสูงในระดับ 70% และไม่ต้องมีการเตรียมวัตถุดิบให้แห้งก่อนสามารถใช้ได้จากยางก้อนที่แข็งตัวในถ้วยรองของขั้นตอนการกรีดยาง

ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุน้ำมันดิบชีวภาพมีปริมาณคาร์บอน และไฮโดรเจนสูง ปริมาณซัลเฟอร์ที่ต่ำเหมาะสมกับการอัดเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์ FT-IR พบว่าการดูดซับ (Absorbance) จุดพีคเกิดขึ้นที่ 2,920 cm⁻¹ แสดงถึงความเข้มข้นของพันธะเคมี หมู่ฟังก์ชันอัลเคน (C-H) มีลักษณะการสั่นที่ยืดตัวแบบไม่สมมาตร จากการเทียบตารางลักษณะฟังก์ชันกรุป

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. F. Demirbas and M. Balat, "Recent advances on the production and utilization trends of bio-fuels: a global perspective," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 15–16, pp. 2371–2381, 2006.
- [2] S. Prasad, V. Venkatramanan, S. Kumar and K. R. Sheetal, "Biofuels: a clean technology for environment management," *Sustainable Green Technologies for Environmental Management*, pp. 219–240, 2019.
- [3] B. Şahin, S. Aslan, Z. Ceylan and S. Yolcular Karaoglu, "Sustainability and socioeconomic impacts of bioenergy," *Bioenergy Studies, Black Sea Agricultural Research Institute*, 2021.
- [4] R.A. Vigouroux, "Pyrolysis of biomass: rapid pyrolysis at high temperature: slow pyrolysis for active carbon preparation," 2001.
- [5] M. Ahmad, M.A. Khan, M. Zafar, M. and S. Sultana, "Biodiesel from non edible oil seeds: a renewable source of bioenergy," in *Economic Effects of Biofuel Production*, 2011.
- [6] M. Balat, "Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – a review of current work," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 2, pp. 1479–1492, 2011.
- [7] A. Krutof and K. Hawboldt, "Blends of pyrolysis oil, petroleum, and other bio-based fuels: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 406–419, 2016.
- [8] H. Li, J. Hu, Z. Zhang, H. Wang, F. Ping, C. Zheng, H. Zhang, Q. He, "Insight into the effect of hydrogenation on efficiency of hydrothermal liquefaction and physico-chemical properties of biocrude oil," *Bioresource Technology*, vol. 163, pp. 143–151, 2014.
- [9] F. Li, S. C. Srivatsa and S. Bhattacharya, "A review on catalytic pyrolysis of microalgae to high-quality bio-oil with low oxygeneous and nitrogenous compounds," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 108, pp. 481–497, 2019.
- [10] N. Ahmad, F. Abnisa and W. M. A. Wan Daud, "Liquefaction of natural rubber to liquid fuels via hydrous pyrolysis," *Fuel*, vol. 218, pp. 227–235, 2018.
- [11] S.W. Murni and T.M. Setyoningrum, "The effect of pyrolysis temperature on charcoal briquettes from biomass waste," *LPPM UPN "Veteran" Yogyakarta Conference Series Proceeding on Engineering and Science Series (ESS)*, vol.1, no. 1, pp.453-460, 2020.
- [12] B. Sugebo, Z. Demrew, S. Feleke and M. Biazen, "Evaluation and characterization of rubber seed oil for biodiesel production," *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021.
- [13] H. Veny, M.A.A.A. Rani, F.H.A. Hamid, N. Aziz, R. A. Sazali and S.S. Idris, "Enzymatic transesterification of rubber seed oil using Immobilized pseudomonas cepacia lipase," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2266, no. 1, p. 012013, 2022.
- [14] N. Ahmad, S. A. S. Dayana, F. Abnisa and W. A. W. D. Mohd, "Natural rubber, a potential alternative source for the synthesis of renewable fuels via hydrous pyrolysis," *IOP*

- Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 334, p. 012004, 2018.
- [15] T. Kan, V. Strezov and T. Evans, “Fuel production from pyrolysis of natural and synthetic rubbers,” *Fuel*, vol. 191, pp. 403–410, Mar. 2017.
- [16] D. Spanò, F. Pintus, C. Mascia, M. A. Scorciapino, M. Casu, G. Floris and R. Medda, “Extraction and characterization of a natural rubber from euphorbia characias latex,” *Biopolymers*, vol. 97, no. 8, pp. 589–594, 2012.
- [17] C. Bottier, “Biochemical composition of hevea brasiliensis latex: a focus on the protein, lipid, carbohydrate and mineral contents,” in *Latex, Laticifers and Their Molecular Components - From Functions to Possible Applications*, R. Nawrot, Ed., Elsevier, 2020, pp. 201–237.
- [18] D. T. Chen, C. A. Perman, M. E. Riechert and J. Hoven, “Depolymerization of tire and natural rubber using supercritical fluids,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 44, no. 1, pp. 53–60, Nov. 1995.
- [19] M. A. Hazrat, M. G. Rasul and M. M. K. Khan, “Lubricity improvement of the ultra-low sulfur diesel fuel with the biodiesel,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 111–117, Aug. 2015.
- [20] N. Ahmad, F. Abnisa and W. M. A. W. Daud, “Potential use of natural rubber to produce liquid fuels using hydrous pyrolysis – a review,” *RSC Advances*, vol. 6, no. 73, pp. 68906–68921, 2016.