

การประเมินเศรษฐศาสตร์ของการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพเชิงพาณิชย์จากน้ำมันพืช

Economic assessment of commercial bio-lubricant production from vegetable oils

เนติพล สกลชาห์¹ พรปวีณ์ พหลพลญาณ¹ แพรวา มณี¹ ฤกษ์พรปวีณ์ พินดิษฐ์² ณัฏพล เจียรสำราญ¹
เมธี สายศรีหยุด¹ อนุสิทธิ์ ธนะพิมพ์เมธา¹ และ เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ^{1, 2*}

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์1

ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านสุุดำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์2

E-mail: netipon.sa@ku.th, pornpaweerwb@gmail.com, parewa.manee.pare@gmail.com,
kritpornpawee.pi@gmail.com, fengnpc@ku.ac.th, fengmts@ku.ac.th, fengjrc@gmail.com,
fengpjs@ku.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (corresponding author)



บทคัดย่อ

น้ำมันหล่อลื่นเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่มีความสำคัญต่อการผลิตในอุตสาหกรรมทุกประเภท งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันพืชเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันหล่อลื่นจากปิโตรเลียม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันถั่วเหลืองและไขปาล์มด้วยโปรแกรม ASPEN Plus และประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ โดยขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพประกอบด้วย การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระ การเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันไม่อิ่มตัว และการดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัวให้เป็นสารเอสเทอร์หรือน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ จากนั้นทำการประเมินเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตที่ออกแบบผลจากการศึกษา พบว่าถ้าใช้น้ำมันถั่วเหลือง 918 กิโลกรัม/ชั่วโมง และไขปาล์ม 696 กิโลกรัม/ชั่วโมง จะได้น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ หรือ 2-เอทิลเฮกซิลเอสเทอร์ 1,814 กิโลกรัม/ชั่วโมง และจากการคำนวณความสามารถในการทำกำไรจะได้ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ เท่ากับ 12.60 บาท อัตราผลตอบแทนภายในร้อยละ 15.24 และมีระยะเวลาคืนทุนที่ 4 ปี 3 เดือน



คำสำคัญ: น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ; น้ำมันถั่วเหลือง; ไขปาล์ม; การประเมินทางเศรษฐศาสตร์



Abstract

Lubricants are essential petroleum products in any industrial production. Therefore, the possibility of bio-lubricant production from vegetable oil to replace petroleum lubricants was studied. The objectives were to construct a process model of the bio-lubricant production from soybean oil and palm fatty acid distillate using the ASPEN Plus

program. Then the economic feasibility of the proposed process was assessed. The bio-lubricant production process comprised converting triglyceride to free fatty acid, concentrating unsaturated fatty acid, and molecular modifying of unsaturated fatty acid to ester or bio-lubricant. The economic assessment showed that if 918 kg/hr of soybean oil and 696 kg/hr of palm fatty acid distillate were used as raw material, 1814 kg/hr of bio-lubricant or 2-ethylhexyl ester was produced. According to the profitability calculation, the net present value (NPV) was 12.60 Baht, the internal rate of return (IRR) was 15.24%, and the pay-back period was 4 years within 3 months.

Keywords: Bio-lubricant; Soybean oil; Palm fatty acid distillate; Economic feasibility

1. บทนำ

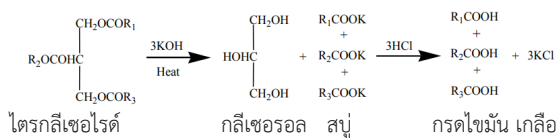
น้ำมันหล่อลื่นเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่มีความสำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลาย มีหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นบริเวณผิวสัมผัสของชิ้นส่วนโลหะและของเครื่องยนต์ เพื่อลดการสึกหรอที่เกิดจากแรงเสียดทาน ช่วยระบายความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีกันระหว่างโลหะ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องยนต์ ซึ่งกระบวนการผลิต การใช้งาน และกระบวนการกำจัดน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากปิโตรเลียมนั้นล้วนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันพืชซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ เช่น น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันปาล์ม จึงสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังผลิตจากวัตถุดิบน้ำมันพืชภายในประเทศ [1, 2]

งานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ จากน้ำมันถั่วเหลือง และไขปาล์ม (Palm fatty acid distillate) ซึ่งได้จากการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ การศึกษาใช้ข้อมูลทฤษฎีภูมิของการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้ 1) การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาสะaponนิฟิเคชัน และปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 2) การแยกกรดไขมันอิ่มตัวออกไป และ 3) การดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ปฏิกิริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ (Epoxide ring opening reaction) และปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน จากนั้นศึกษาความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพที่ออกแบบ วิเคราะห์ต้นทุน พิจารณามูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน และระยะเวลาคืนทุน

2. การผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพจากน้ำมันถั่วเหลืองและไขปาล์ม

2.1 การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้ได้กรดไขมันอิสระ

การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้ได้กรดไขมันอิสระโดยการทำปฏิกิริยา 2 ครั้ง ๆ แรกใช้ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันน้ำมันถั่วเหลืองกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะได้สบู่ และครั้งที่สองทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสบู่ที่ได้ด้วยกรดแก่ ซัลฟิวริก ได้เป็นกรดไขมันอิสระ (ภาพที่ 1) การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระนี้มีหลายวิธีแต่วิธีนี้มีข้อดีที่ชัดเจนคือ เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับน้อย และสามารถแยกกรดไขมันอิสระออกมาได้ง่าย [4, 5]



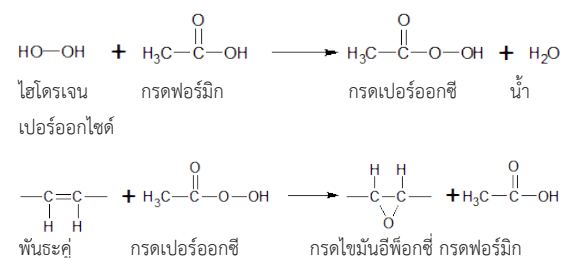
ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันและไฮโดรไลซิส

2.2 การแยกกรดไขมันอิ่มตัว

การแยกกรดไขมันอิ่มตัวทำโดยการตกผลึกด้วยยูเรีย เป็นกระบวนการทั่วไปในการทำสารเคมีอินทรีย์ที่เป็นของแข็งให้บริสุทธิ์ [4] สามารถทำได้โดยละลายยูเรียและกรดไขมันอิสระที่ได้จากขั้นตอนแรกด้วยสารตัวทำละลาย จากนั้นลดอุณหภูมิลงจนเกิดการตกผลึกใหม่ของกรดไขมันอิ่มตัวและยูเรียจะมีสถานะเป็นของแข็ง แล้วกรองยูเรียและกรดไขมันอิ่มตัวออกไป [4, 5]

2.3 การดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว

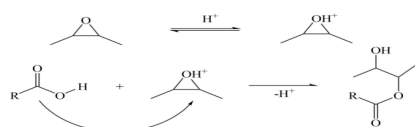
นำกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่อยู่ในส่วนของเหลวจากขั้นตอนที่แล้วนำมาดัดแปลงโครงสร้างโดยปฏิกิริยาอีก 3 ปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ปฏิกิริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ และปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดย 1) ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนพันธะคู่ของคาร์บอน-คาร์บอน (C – C) เป็นออกซิเรน (C – O – C โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และกรดฟอร์มิกเพื่อทำให้ได้กรดเปอร์ออกซีก่อน แล้วนำกรดเปอร์ออกซีนี้นำไปทำปฏิกิริยากับกรดไขมันไม่อิ่มตัว จะได้กรดไขมันอีพอกซี (Epoxy fatty acid) ซึ่งมีหมู่ออกซิเรนในโมเลกุล และกรดฟอร์มิก กลับคืนมาดังภาพที่ 2 ซึ่งกรดฟอร์มิกสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ กระบวนการอีพอกซิเดชันนี้จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในด้านความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation stability) ของน้ำมัน เพิ่มความหนืด และอุณหภูมิของจุดวาบไฟ [4, 5]



ภาพที่ 2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันบนพันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว [5]

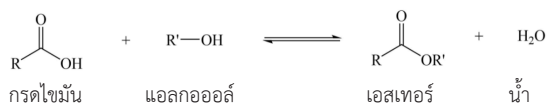
2) ปฏิกิริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ จะเกิดขึ้นบริเวณแขนของพันธะคาร์บอน-ออกซิเจน (C – O) ข้างใด

ข้างหนึ่งของหมู่ออกซิเรนบนโมเลกุลของกรดไขมัน อีพอกซีที่ได้จากปฏิกิริยาอีพอกซีเคชันของกรดไขมัน ไม่อิ่มตัว โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเสร็จสิ้น ปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของหมู่ออกซิเรนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยแขนข้างหนึ่งของพันธะจะกลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และอีกข้างหนึ่งจะเกิดเป็นพันธะเอสเทอร์ (R-COO-R') หรือเรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่า สารประกอบไฮดรอกซีเอสเทอร์ (Hydroxy ester compounds) [4, 5]



ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาการเปิดวงออกซิเรนด้วยกรดไขมัน อีسرโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [4]

3) ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันและ แอลกอฮอล์ โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน [5]

3. การวิเคราะห์ การประมาณต้นทุน ความสามารถในการทำกำไรของการลงทุน

การวิเคราะห์ และการประมาณต้นทุน เป็นสิ่งจำเป็นที่สำคัญในการตัดสินใจของผู้ประกอบการ ก่อนที่จะดำเนินการซื้อและติดตั้งเครื่องจักรต่าง ๆ

รวมไปถึงการจัดหาที่ดิน สิ่งอำนวยความสะดวกในการผลิต อีกทั้งการวางท่อ การควบคุม การติดตั้งเครื่องจักรและอื่น ๆ ทั้งหมด นอกจากนี้ยังต้องมีเงินทุนเพื่อชำระค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานของโรงงานก่อนที่จะมีรายได้จากการขาย

เงินทุนที่จำเป็นในการจัดหาสิ่งอำนวยความสะดวกในการผลิตและสิ่งอำนวยความสะดวกในโรงงานเรียกว่าเงินลงทุนแบบคงที่หรือเงินลงทุนในสินทรัพย์ถาวร (Fixed Capital Investment; FCI) โดยต้นทุนที่ใช้ไปทั้งหมดของการลงทุนในสินทรัพย์ถาวรจะทยอยคืนในรูปค่าเสื่อมราคารายปีจนหมดตามอายุการใช้งาน ซึ่งการลงทุนในสินทรัพย์ถาวรจะประกอบด้วย ต้นทุนทางตรง (Direct Cost; D) หรือ เงินลงทุนคงที่ในส่วนของการกระบวนการผลิต หมายถึง ต้นทุนที่สามารถคำนวณแยกออกมาได้ว่ามีจำนวนเท่าไรในการผลิตสินค้าแต่ละหน่วย ต้นทุนทางอ้อม (Indirect Cost; I) หรือ เงินลงทุนคงที่ในส่วนอื่นๆของโรงงาน ซึ่งหมายถึงต้นทุนที่ไม่สามารถคำนวณแยกออกมาได้ว่ามีจำนวนเท่าไร [6]

เงินลงทุนสำหรับการดำเนินงานของโรงงานเรียกว่าเงินทุนหมุนเวียน (Working Capital; WC) คือ เงินทุนที่กิจการต้องใช้หมุนเวียนสำหรับการดำเนินงานก่อนที่จะกิจการจะได้รับเงินสดจากการขายสินค้าและบริการ โดยจะเตรียมเงินทุนหมุนเวียนสำหรับการผลิต 1 เดือนโดยประมาณ ซึ่งอัตราส่วนของเงินทุนหมุนเวียนต่อการลงทุนทั้งหมดจะแตกต่างกันไปตามบริษัทต่างๆ แต่โรงงานเคมีส่วนใหญ่ใช้เงินทุนหมุนเวียนเริ่มต้นเป็นจำนวนร้อยละ 10 ถึง

20 ของเงินลงทุนทั้งหมด และอาจเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 50 หรือมากกว่าสำหรับบริษัทที่ผลิตสินค้าตามความต้องการตามฤดูกาล และสุดท้ายเงินทุนหมุนเวียนนี้จะได้คืนเมื่อเลิกกิจการ [6]

การวิเคราะห์ความสามารถในการทำกำไรของการลงทุน ในโรงงานขนาดใหญ่มักจะใช้วิธี ที่พิจารณามูลค่าเวลาของเงินเป็นหลัก ประกอบด้วย อัตราผลตอบแทนของผลตอบแทน (Internal Rate of Return; IRR) และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) ส่วนโรงงาน ขนาดเล็กมักจะวิเคราะห์ด้วยระยะเวลาในการคืนทุน (Payback Period) คือระยะเวลาที่โรงงานเริ่มมีกำไร [6]

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ เป็นการคำนวณหามูลค่าปัจจุบันรวมของเงินสดรับเมื่อนำไปหักออกด้วยเงินลงทุน โดยใช้ต้นทุนของเงินทุนเป็นอัตราในการคิดลดกระแสเงินสดรับ ในการเลือกโครงการ ค่า NPV จะแสดงให้เห็นว่าโครงการที่กำลังพิจารณา มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิของการลงทุนเป็นมูลค่าเท่าไรเมื่อสิ้นสุดโครงการ ถ้าค่า NPV มีค่าเป็นบวก แสดงว่าโครงการดังกล่าวสมควรที่จะลงทุน ฉะนั้นจึงเลือกโครงการที่ให้ค่า NPV เป็นบวกสูงที่สุด [6]

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - I \quad (1)$$

เมื่อ CF_t คือ กระแสเงินสดรับสุทธิ ณ ปีที่ t I คือ เงินสดจ่ายลงทุนของโครงการ k คือ ค่าของทุนหรืออัตราผลตอบแทนที่ต้องการ และ n คือ อายุโครงการ

อัตราผลตอบแทนภายใน คือ อัตราลดค่า ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดที่คาดว่าจะต้องจ่ายในการลงทุนเท่ากับมูลค่าในปัจจุบันของกระแสเงินสดที่คาดว่าจะได้รับตลอดอายุโครงการ ซึ่งการคำนวณหาอัตรา IRR ก็คือการหาอัตราลดค่าที่ทำให้ NPV มีค่าเท่ากับ 0 ถ้าอัตราผลตอบแทนภายในมีมากกว่าหรือเท่ากับค่าต้นทุน โดยทั่วไปถือว่าโครงการนั้นสมควรที่จะลงทุน [6]

$$I = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} \quad (2)$$

เมื่อ CF_t คือ กระแสเงินสดรับสุทธิ ณ ปีที่ t I คือ เงินสดจ่ายลงทุนของโครงการ k คือ ค่าของทุนหรืออัตราผลตอบแทนที่ต้องการ และ n คือ อายุโครงการ

ระยะคืนทุน คือ ระยะเวลาที่กระแสเงินสดรับจากโครงการ สามารถชดเชยกระแสเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิตอนเริ่มโครงการพอดี เนื่องจากโครงการที่ขอรับการสนับสนุน จะมีลักษณะการลงทุนเพียงครั้งเดียวในปีแรก ระยะเวลาคืนทุนเป็นเครื่องมือในการประเมินความเป็นไปได้ของการลงทุนอย่างง่าย เป็นการประเมินคร่าว ๆ และรวดเร็วเหมาะกับเงินลงทุนจำนวนไม่มาก ซึ่งในการเลือกโครงการค่าระยะเวลาคืนทุนจะแสดงให้เห็นว่าต้องใช้เวลานานเพียงใดในการได้ทุนคืน ถ้าสามารถได้ทุนคืนเร็ว โครงการก็จะน่าสนใจ [6]

$$\text{ระยะคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนสุทธิเริ่มแรก}}{\text{เงินสดรับสุทธิแต่ละปี}} \quad (3)$$

4. วิธีการดำเนินงาน



4.1 อุปกรณ์ซอฟต์แวร์ที่ใช้

Aspen plus v.11 และ Microsoft Office 2019

4.2 สมมติฐานในกระบวนการผลิต

กำหนดให้กระบวนการผลิตเป็นสภาวะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady state) น้ำมันถั่วเหลืองประกอบด้วยไตรโอเลอิน และไตรปาลมิทิน โดยมีสัดส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.8409 และ 0.1591 ตามลำดับ ไชปาล์มประกอบด้วยกรดปาลมิติก และกรดโอเลอิก โดยมีสัดส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.5607 และ 0.4393 ตามลำดับ ปฏิกริยาสะปอนนิฟิเคชันและปฏิกริยาไฮโดรไลซิส มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ (%Conversion) 100 [5] ปฏิกริยาการเปลี่ยนกรดฟอร์มิกให้เป็นกรดเปอร์ออกซีด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ 92.89 [5] กระบวนการดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ทำโดยการรวมปฏิกริยาอีพอกซิเดชัน ปฏิกริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ด้วยไฮปาล์ม และปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เข้าด้วยกันโดยกำหนดให้ไม่เหลือสารมัธยันตร์ และมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ 98 [5] ในปฏิกริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ด้วยไฮปาล์มนั้น มีการเลือกกรดไขมันอิสระของไฮปาล์มไปใช้ในการเกิดปฏิกริยาตามอัตราส่วนโดยมวลของกรดไขมันอิสระของไฮปาล์ม

4.3 สมมติฐานในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

กำหนดให้ กำลังการผลิต 13,062.71 ตัน/ปี อ้างอิงจากการดำเนินงาน 300 วันต่อปี และ 24

ชั่วโมง/วัน ระยะเวลาการผลิต (Operating time) 7,200 ชั่วโมง/ปี กระบวนการผลิตเป็นแบบ Solid - fluid processing plant อายุการดำเนินงานของโครงการ คือ 10 ปี อัตราผลตอบแทนต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ คือร้อยละ 10 ต่อปี อัตราภาษีนิติบุคคลอยู่ที่ร้อยละ 20 ต่อปี อัตราการแลกเปลี่ยนเงิน 1 US\$ = 33.13 บาท การประมาณเงินลงทุนเริ่มต้นทั้งหมด ใช้การประมาณด้วยวิธีเทียบร้อยละของราคาต่างๆ กับราคาของอุปกรณ์ทั้งหมดในกระบวนการผลิตที่รวมค่าจัดส่ง สิทธิทรัพย์สินทางปัญญา เป็นร้อยละ 15 ของเงินลงทุนทั้งหมด การคำนวณต้นทุนผลิตภัณฑ์รวม (TPC) อ้างอิงจากสัดส่วนค่าใช้จ่ายในส่วนต่างๆ ของกระบวนการผลิตของอเมริกา ซึ่งกำหนดให้เป็นต้นทุนต่อปีในปีแรกที่มีกำลังการผลิตร้อยละ 100 [6] โดยการผลิตเป็นประเภท B (Average conditions) ค่า Operating supervision เป็นร้อยละ 15 ของ Operating Labor ข้อมูล Utilities ใช้จาก Aspen ค่าไฟ 226.56 บาท/ชั่วโมง ค่าสารทำความสะอาด 14.82 บาท/ชั่วโมง ค่าไอน้ำ 995.73 บาท/ชั่วโมง ค่าซ่อมบำรุง เป็นร้อยละ 7 ของ FCI ค่า Operating supplies เป็นร้อยละ 15 ของ Maintenance and repair ค่า Laboratory charges เป็นร้อยละ 15 ของ Operating labor ค่า Royalties เป็นร้อยละ 4 ของ TPC ค่าภาษี เป็นร้อยละ 2 ของ FCI ค่า Financing เป็นร้อยละ 5 ของเงินกู้ยืม โดยที่การกู้ยืมเงินเป็นร้อยละ 30 ของ TCI ค่าประกัน (Insurance) เป็นร้อยละ 1 ของ FCI ค่าเช่าที่ 5,000,000 บาท/ปี ค่าเสื่อมราคาเป็นร้อยละ 10 ของ FCI กำหนดให้เป็นค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรง และไม่มีมูลค่าซาก

ของโรงงาน ค่า Plant overhead เป็นร้อยละ 60 ของ Labor, Supervision, and Maintenance ค่า Administration เป็นร้อยละ 20 ของ Labor, Supervision, and Maintenance ค่า Distribution and selling เป็นร้อยละ 5 ของ TPC ค่าวิจัยและพัฒนา เป็นร้อยละ 5 ของ TPC ตารางที่ 1 แสดงราคาตลาดของสารที่ใช้ในกระบวนการผลิต

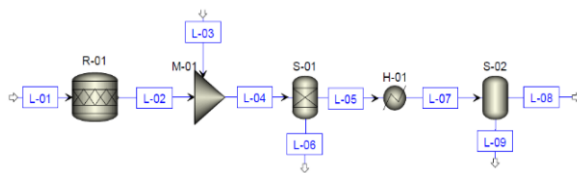
ตารางที่ 1 ราคาตลาดของสารที่ใช้ในกระบวนการ

ชื่อสารเคมี	ราคา (บาท/ตัน) [7-9]
ผลิตภัณฑ์น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ	117,280.20
น้ำมันถั่วเหลือง	3,147.35
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	9,276.40
กรดไฮโดรคลอริก	33,130.00
น้ำ	14,500.00
เอทานอล	27,350.00
ยูเรีย	2,981.70
เฮกเซน	15,604.23
กรดฟอร์มิก	11,595.50
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	7,454.25
2-เอทิลเฮกซานอล	39,756.00
กรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก	33,130.00
โทลูอิน	24,516.20

5. ผลการทดลอง

น้ำมันถั่วเหลือง โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งละลายในเอทานอล และกรดไฮโดรคลอริก สารตั้งต้นทั้งหมดถูกลำเลียง (L-01) เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ (R-01) เพื่อเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระ ด้วยปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ หลังปฏิกิริยาเสร็จสิ้น สารทั้งหมดจะถูกลำเลียง (L-02)

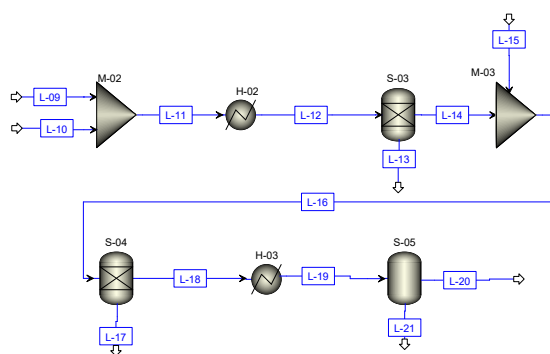
ไปยังถังผสม (M-01) เพื่อแยกกรดไขมันอิสระ โดยการเติมน้ำ (L-03) ลงไปในสารละลาย ของเหลวจะแยกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นที่เป็นสารละลายน้ำจะอยู่ด้านล่าง และชั้นที่เป็นสารไม่ละลายน้ำจะอยู่ด้านบน จากนั้นลำเลียง (L-04) เข้าสู่เครื่องแยกของเหลว (S-01) โดยชั้นที่อยู่ด้านล่างจะถูกแยกออก (L-06) ส่วนชั้นที่อยู่ด้านบนจะถูกลำเลียง (L-05) ต่อไปเข้าสู่เครื่องทำความร้อน (H-01) เพื่อระเหยน้ำที่ยังหลงเหลือที่ 105 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะลำเลียง (L-07) เข้าสู่เครื่องแยก (S-02) เพื่อแยกส่วนที่เป็นไอออกจากของเหลวซึ่งจะออกทางด้านบน (L-08) และกรดไขมันอิสระที่เป็นของเหลวออกทางด้านล่าง (L-09) ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แบบจำลองกระบวนการย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ในโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ให้ได้กรดไขมันอิสระ

สำหรับขั้นตอนการแยกกรดไขมันอิ่มตัวทำโดยนำกรดไขมันอิสระ (L-09) ยูเรีย และเอทานอล (L-10) เข้าสู่ถังผสม (M-02) เพื่อละลายยูเรีย จากนั้นลดอุณหภูมิโดยลำเลียง (L-11) เข้าสู่เครื่องทำความเย็น (H-02) ที่อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส เพื่อให้ยูเรียเกิดการตกผลึกใหม่ โดยกรดไขมันอิ่มตัวจะตกผลึกร่วมกับยูเรีย จากนั้นลำเลียง (L-12) เข้าสู่เครื่องกรอง

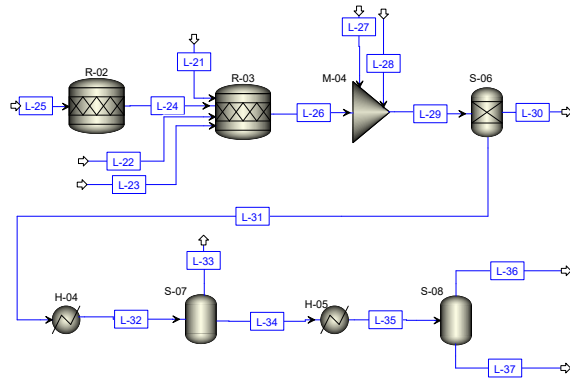
ของแข็ง (S-03) เพื่อนำฟลักกูเรียและกรดไขมันอิ่มตัวออก (L-13) จะได้ของเหลวที่เป็นกรดไขมันอิสระที่มีความเข้มข้นของกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากขึ้น (L-14) จากนั้นนำเลี้ยงเข้าสู่ถังผสม (M-03) เพื่อสกัดกรดไขมันด้วยเฮกเซน (L-15) ก่อนที่จะลำเลี้ยง (L-16) เข้าสู่เครื่องแยกของเหลว (S-04) โดยของเหลวชั้นล่างจะเป็นสารที่มีขี้ที่ละลายอยู่ในเอทานอล (L-17) ของเหลวชั้นบนจะเป็นสารที่ไม่มีขี้ละลายในเฮกเซน ซึ่งจะถูกแยกและลำเลี้ยง (L-18) เข้าสู่เครื่องทำความร้อน (H-03) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยเฮกเซนก่อนที่จะลำเลี้ยง (L-19) เข้าสู่เครื่องแยก (S-05) ส่วนที่เป็นไอจะถูกแยกออก (L-20) ส่วนที่เป็นของเหลวจะถูกลำเลี้ยง (L-21) เข้ากระบวนการถัดไป ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แบบจำลองกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันไม่อิ่มตัว

กระบวนการดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว กรดไขมันอิสระที่ผ่านกระบวนการในภาพที่ 6 จะถูกลำเลี้ยง (L-21) เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ (R-03) พร้อมกับไฮปาล์ม 2-เอทิลเฮกซานอล (L-23) และกรดเปอร์ออกไซด์ (L-24) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา

กรดซัลฟิวริก และพาราโทลูอินซัลโฟนิกละลายในโทลูอิน (L-22) เพื่อดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัวด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ปฏิกิริยาการเปิดวงอีพอกไซด์ด้วยไฮปาล์ม และปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน ซึ่งกรดเปอร์ออกไซด์ (L-24) เตรียมได้จากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และกรดฟอร์มิก (L-25) ทำปฏิกิริยาเปลี่ยนให้เป็นกรดเปอร์ออกไซด์ที่เครื่องปฏิกรณ์ (R-02) เมื่อปฏิกิริยาการดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเสร็จสิ้นจะได้เป็นน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ 2-เอทิลเฮกซิลเอสเทอร์ จากนั้นลำเลี้ยง (L-26) เข้าสู่ถังผสม (M-04) พร้อมกับเฮกเซน (L-28) และน้ำ (L-27) เพื่อสกัดสารไม่มีขี้ด้วยเฮกเซน จากนั้นเติมน้ำไปละลายสารที่มีขี้แล้วลำเลี้ยง (L-29) เข้าสู่เครื่องแยกของเหลว (S-06) โดยที่สารมีขี้จะอยู่ชั้นล่างและถูกแยกออก (L-30) ส่วนสารที่อยู่ชั้นบนซึ่งถูกสกัดด้วยเฮกเซนจะถูกลำเลี้ยง (L-31) เข้าสู่เครื่องทำความร้อน (H-04) อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยแยกเฮกเซนออกไป ก่อนที่จะลำเลี้ยง (L-32) เข้าสู่เครื่องแยก (S-07) ซึ่งสารที่เป็นไอจะถูกแยกออกทางด้านบน (L-33) ส่วนสารที่เป็นของเหลวจะถูกลำเลี้ยง (L-34) เข้าสู่เครื่องทำความร้อน (H-05) เพื่อระเหยโทลูอินและน้ำบางส่วนที่ติดมา ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นจะลำเลี้ยง (L-35) เข้าสู่เครื่องแยก (S-08) โดยที่สารที่เป็นไอจะถูกแยกออก (L-36) และส่วนที่เป็นของเหลวคือน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ 2-เอทิลเฮกซิลเอสเทอร์ถูกแยกออกทางด้านล่าง (L-37) ก่อนที่นำไปเก็บไว้ในถังเก็บเพื่อรอจำหน่ายดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แบบจำลองกระบวนการตัดแปลง
โครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว

เมื่อทำการจำลองการผลิตในโปรแกรม ASPEN Plus โดยใช้ NRTL เป็น property method ตามข้อสมมติฐานในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ข้างต้นของกระบวนการในภาพที่ 5-7 จะได้ปริมาณของสารทั้งหมดที่เข้าและออกในกระบวนการผลิตดังตารางที่ 2 และความต้องการพลังงานรวมที่คำนวณจากโปรแกรม ASPEN Plus และราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ ดังตารางที่ 3 รวมทั้งสาหร่ายบิโภาคที่ใช้ในกระบวนการผลิตดังตารางที่ 4

ตารางที่ 2 ปริมาณของสารทั้งหมดที่เข้าและออก
ในกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

ส่วนประกอบ	อัตราการไหลเชิงมวล (กก./ชม.)		
	ขาเข้า	ขาออก	
		ผลิตภัณฑ์	อื่นๆ
น้ำมันถั่วเหลือง	917.7	0.0	0.0
กรดไขมันไม่อิ่มตัว	0.0	12.9	7.4
กรดไขมันอิ่มตัว	0.0	1.4	137.7
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	260.1	0.0	81.9
กรดไฮโดรคลอริก	175.4	0.0	59.6

ส่วนประกอบ	อัตราการไหลเชิงมวล (กก./ชม.)		
	ขาเข้า	ขาออก	
		ผลิตภัณฑ์	อื่นๆ
กลีเซอรอล	0.0	0.0	97.5
โพแทสเซียมคลอไรด์	0.0	0.0	236.7
น้ำ	2,947.8	0.0	3,147.8
เอทานอล	1,113.5	0.0	1,113.5
ยูเรีย	875.67	0.0	875.7
เฮกเซน	1,378.5	0.6	1377.9
กรดฟอร์มิก	550.0	0.0	274.8
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	719.2	0.0	341.6
กรดเปอร์ออกซี	0.0	0.0	370.8
โซปาล์ม	695.7	11.0	0.5
2-เอทิลเฮกซานอล	678.1	0.0	344.6
กรดพาราโทลูอินซิลโฟนิค	172.6	0.0	172.6
โทลูอิน	637.4	2.3	635.1
2-เอทิลเฮกซิลเอสเทอร์	0.0	1,814.3	3.3
กรดซัลฟิวริก	7.3	0.0	7.3
ทั้งหมด	11,129	1,843	9,286

ตารางที่ 3 ความต้องการพลังงานรวมคำนวณจาก
โปรแกรม ASPEN และราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ใน
กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

อุปกรณ์	ความต้องการพลังงานรวม (กิโลวัตต์)	ราคา (บาท/เครื่อง)
เครื่องปฏิกรณ์ R-01	231.2	2,077,251.00
ถังผสม M-01, M-02, M-03, M-04	0.0*	450,568.00
เครื่องแยกของเหลว S-01	37.2	546,645.00
เครื่องทำความร้อน H-01	65.2	301,483.00
เครื่องแยก S-02, S-05, S-07, S-08	0.0*	546,645.00
เครื่องทำความเย็น H-02	109.3	341,239.00
เครื่องกรองของแข็ง S-03	0.1	546,645.00
เครื่องแยกของเหลว S-04	0.8	546,645.00
เครื่องทำความร้อน H-03	189.4	357,804.00
เครื่องปฏิกรณ์ R-02	33.8	1,553,797.00

อุปกรณ์	ความต้องการ พลังงานรวม (กิโลวัตต์)	ราคา (บาท/เครื่อง)
เครื่องปฏิกรณ์ R-03	565.3	2,077,251.00
เครื่องแยกของเหลว S-06	160.7	632,783.00
เครื่องทำความร้อน H-04	394.2	371,056.00
เครื่องทำความร้อน H-05	238.0	371,056.00
รวมราคา		13,712,507.00

หมายเหตุ * ความต้องการพลังงานรวม 0 กิโลวัตต์ หมายถึง อุปกรณ์ไม่มีการใช้พลังงาน

ตารางที่ 4 สาธารณูปโภคที่ใช้ในกระบวนการผลิต

สาธารณูปโภค	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท/ชม.)
ไฟฟ้า	88.24 กิโลวัตต์	226.5628
สารทำความเย็น (ฟรียอน 12)	2387.27 กก./ชม.	14.8210
ไอน้ำ (ที่ 165 PSI)	458.87 กก./ชม.	327.1087
ไอน้ำ (ที่ 400 PSI)	781.63 กก./ชม.	668.5198

คำนวณเงินลงทุนเริ่มต้นทั้งหมดสำหรับกระบวนการผลิต TPI TPC ในโปรแกรม Excel ได้ผลดังตารางที่ 5 คำนวณ NPV และ %IRR ตามสมการ 1 และ 2 ได้เท่ากับ 12.60 บาท และ 15.24 คำนวณกระแสเงินสดตลอด 10 ปีของโครงการดังตารางที่ 6 และคำนวณระยะเวลาคืนทุนตามสมการที่ 3 พบว่าจะคืนทุนในระยะเวลา 4 ปี 3 เดือน

ตารางที่ 5 ต้นทุนค่าก่อสร้างโรงงาน เงินลงทุนทรัพย์สินถาวร และเงินลงทุนหมุนเวียน

Title	Bio lubricant production	
Fluid processing plant		
Estimating Capital Investment based on Percentage of Delivered-Equipment Cost Method		
Component	Percent of Delivered-equipment cost	Cost in MTHB
Direct Costs		
Purchased equipment delivered	100	13.7125
Purchased equipment installation	39	5.3479
Instrumentation and controls	26	3.5653
Piping	31	4.2509
Electrical system	10	1.3713
Building	29	3.9766
Yard improvement	12	1.6455
Service facilities	55	7.5419
Total direct plant costs	302	41.4118
Indirect costs		
Engineering and supervision	32	4.3880
Construction expenses	34	4.6623
Legal expenses	4	0.5485
Contractor's fee	19	2.6054
Contingency	37	5.0736
Total indirect plant costs	126	17.2778
FCI	428	58.6895
WC = 0.15*TCI	75	10.2844
TCI	503	68.9739



ตารางที่ 6 กระแสเงินสดตลอดอายุการดำเนินงาน (ล้านบาท)

Year	Cost	Revenue	Mortgage				Depreciation	Taxable Income	Tax (20%)	ATCF	Cum. A _j
			A	I	P	R					
0	-48.28					20.69				-48.28	-38.91
1	-1517.75	1532.00	-2.68	-1.0	-1.65	19.05	-5.87	7.35	-2.20	9.37	-29.55
2	-1517.75	1532.00	-2.68	-1.0	-1.73	17.32	-5.87	7.43	-2.23	9.34	-20.21
3	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.9	-1.81	15.51	-5.87	7.52	-2.25	9.32	-10.89
4	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.8	-1.90	13.60	-5.87	7.61	-2.28	9.29	-1.60
5	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.7	-2.00	11.60	-5.87	7.70	-2.31	9.26	7.66
6	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.6	-2.10	9.50	-5.87	7.80	-2.34	9.23	16.89
7	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.5	-2.20	7.30	-5.87	7.91	-2.37	9.20	26.09
8	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.4	-2.31	4.98	-5.87	8.02	-2.41	9.17	35.26
9	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.2	-2.43	2.55	-5.87	8.13	-2.44	9.13	44.39
10	-1517.75	1532.00	-2.68	-0.1	-2.55	0.00	-5.87	8.25	-2.48	9.09	53.48
10		10.28								10.28	63.77

6. สรุปผลการทดลอง



6.1 ผลสรุปด้านเทคนิคการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

จากผลการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพโดยใช้น้ำมันถั่วเหลือง และไฮปาล์ม พบว่าในขั้นตอน 1) การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นกรดไขมันอิสระโดยปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน และปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งใช้น้ำมันถั่วเหลือง 918 กิโลกรัม/ชั่วโมง ได้กรดไขมันอิสระ 877 กิโลกรัม/ชั่วโมง ต่อมาในขั้นตอน 2) การแยกกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยการตกผลึกด้วยยูเรียสามารถทำให้กรดไขมันไม่อิ่มตัวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 84.15 เป็นร้อยละ 99.64 และในขั้นตอน 3) การดัดแปลงโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัวด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน ปฏิกิริยา

การเปิดวงอีพอกไซด์ด้วยไฮปาล์ม และปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน ซึ่งใช้ไฮปาล์ม 696 กิโลกรัม/ชั่วโมง เข้าทำปฏิกิริยาทำให้ได้ 2-เอทิลเฮกซิลเอสเทอร์ 1,814 กิโลกรัม/ชั่วโมง

6.2 ผลสรุปด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ

เงินลงทุนเริ่มต้นทั้งหมดสำหรับกระบวนการผลิต 68.9 ล้านบาท ต้นทุนผลิตสินค้ารวมสำหรับกระบวนการผลิตรวมค่าเสื่อมราคา 1,524.6 ล้านบาท/ปี มีรายได้จากการขายน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ 1,531.9 ล้านบาท/ปี เมื่อนำไปวิเคราะห์หาความสามารถในการทำกำไรพบว่าโครงการนี้ควรลงทุนเนื่องจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวก และสามารถคืนทุนได้ภายใน 4 ปี 3 เดือน

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคุณคุณธรรธร สุวลีรัตน์ ในการช่วยเตรียมข้อมูล จัดรูปแบบ และตรวจทาน บทความ

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Adhvaryu A, Liu Z, and Erhan S Z (2005). Synthesis of novel alkoxylated triacylglycerols and their lubricant base oil properties. *Ind. Crops Prod*, 21: 113–119.

[2] Hossain M A, Iqbal M A M, Julkapli N M, Kong P S, Ching J J, and Lee H V (2018). Development of catalyst complexes for upgrading biomass into ester-based biolubricants for automotive applications: a review. *RSC Adv.*, 8: 5559–5577.

[3] Salimon J, Abdullah B M, and Salih N (2011). Hydrolysis Optimization and Characterization Study of Preparing Fatty Acids from *Jatropha Curcas* seed Oil. *Chemistry Central Journal*, 5(1): 67.

[4] กฤษฎ์พรปวีณ์ พินดิษฐ์ (2561). การเพิ่มมูลค่าน้ำมันพืชโดยการสังเคราะห์เป็นน้ำมันหล่อลื่นชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ประเทศไทย.

[5] Pindit K, Thanapimmetha A, Saisriyoot M, and Srinophakun P (2021). Biolubricant basestocks synthesis using 5-step reaction

from *jatropha* oil, soybean oil, and palm fatty acid distillate. *Industrial Crops & Products*, 166: 113484.

[6] Peter S, Timmerhaus D, and West E (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*.

[7] Alibaba (2022). RD5012A factory price lubricant packages hydraulic oil additive, brand name lubricants T 6162 SL 5W/40 Gasoline engine oil additive package, T 616 0W/40 5W/40 liquid tackifier automotive lubricant engine oil additive, Belgium Bottled 900ml refined soybean oil soyabean refined soybean oil soya bean oil, Low Price White Flake 1310-58-3 Potassium Hydroxide 95%, Cas 7664-39-3 40% 49% 55% 70% Hydrofluoric Acid HF, Best Price Urea 46% Granular Fertilizer from Ukraine, manufacturer price formic acid 85, Hydrogen peroxide, Indonesia palm oil palm fatty acid distillate PFAD in drum, High Quality P-Toluenesulfonic Acid Monohydrate CAS: 6192-52-5 with Best and Cheap Price, Sulfuric acid, sateri sodium sulphate anhydrous manufacturers sodium sulphate supplier In: Alibaba. Available via DIALOG. <https://www.alibaba.com/product-detail>. Accessed 24 Feb 2022.

[8] Echemi (2022). Toluene International



Price. In: Echemi. Available via DIALOG. <https://www.echemi.com>. Accessed 24 Feb 2022.

[9] Made-in-Chain (2022). Indonesia Palm Kernel Fatty Acid Distillate with Low

Price, 99.9% 2-Ethylhexanol / 2-Ethyl-1-Hexanol/ Isooctyl Alcohol with Best Price CAS No 104-76-7 In: zhongliantrading, hbyanxi. Available via DIALOG. <https://en.made-in-china.com/product>. Accessed 24 Feb 2022.