

Tối ưu hóa quy trình sản xuất dầu nặng sinh học từ dịch chiết vỏ hạt điều

Vũ Thị Minh Hồng*

Bộ môn Hóa học, Trường Đại học Mở - Địa chất, 18 phố Viên, phường Đức Thắng, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 6/8/2025; ngày chuyển phản biện 8/8/2025; ngày nhận phản biện 29/8/2025; ngày chấp nhận đăng 5/9/2025

Tóm tắt:

Nghiên cứu này tập trung tối ưu hóa quy trình, nâng cao hiệu suất sản xuất dầu nặng sinh học (bio-heavy oil) từ dịch chiết thô vỏ hạt điều bằng hệ thống dây chuyền thiết bị và xúc tác acid hữu cơ nhằm giảm phát thải khí ô nhiễm. Sau khi xác định được tỷ lệ xúc tác/dung dịch dầu điều thô quy mô phòng thí nghiệm, mẫu được thử nghiệm quy mô pilot, mẫu sản phẩm được xác định các chỉ tiêu như sau: trị số nhiệt lượng theo ASTM D240-19 đạt trên 9.000 cal/kg, hàm lượng tạp chất theo ASTM D473-22 có giá trị <0,01%, hàm lượng tro theo ASTM D482-19 có giá trị <0,1%. Tuy nhiên, hàm lượng nước xác định theo ASTM D6304-20 vẫn còn khá cao, khoảng 0,5%. Nghiên cứu ban đầu đã cho thấy, tiềm năng tạo ra sản phẩm dạng dầu sinh học ít tạp chất, có giá trị nhiệt lượng đáp ứng tiêu chuẩn dầu nhiên liệu hiện nay và có tiềm năng giảm phát thải khí oxit lưu huỳnh (SO_x), có thể phối trộn với tỷ lệ phù hợp để sử dụng cho động cơ tàu biển hay trong lò hơi các nhà máy nhiệt điện hoặc các khu công nghiệp.

Từ khóa: dầu nhiên liệu, dầu sinh học, dịch chiết thô vỏ hạt điều.

Chỉ số phân loại: 2.4, 2.11

Optimisation of the bio-heavy oil production process from crude cashew nut shell liquid

Thi Minh Hong Vu*

Department of Chemistry, University of Mining and Geology, 18 Vien Street, Duc Thang Ward, Hanoi, Vietnam

Received 6 August 2025; revised 29 August 2025; accepted 5 September 2025

Abstract:

The article focuses on optimising the process, enhancing the production efficiency of bio-heavy oil from crude cashew nut shell liquid using a system of equipment lines and organic acid catalysts in order to mitigate the emission of polluting gases to the environment. After determining the optimal catalyst-to-cashew oil solution ratio at the laboratory scale, the process was tested at the pilot scale. The product oil samples were characterised with the following parameters: calorific value determined according to ASTM D240-19 exceeding 9,000 cal/kg, impurity content per ASTM D473-22 below 0.01%, and ash content per ASTM D482-19 below 0.1%. However, the water content determined according to ASTM D6304-20 remained relatively high, at about 0.5%. The preliminary results show the potential to create bio-oil products with low impurity levels and a calorific value that meets current fuel-oil standards while potentially reducing sulfur oxides (SO_x) emissions, which can be mixed at appropriate ratios for use in marine engines or in boilers at thermal power plants or industrial facilities.

Keywords: bio-heavy oil, cashew nut shell liquid, fuel oil.

Classification numbers: 2.4, 2.11

*Email: vuthiminhong@humg.edu.vn

1. Đặt vấn đề

Vỏ hạt điều sau khi xử lý sơ bộ (phơi khô, loại bỏ tạp chất, nghiền hoặc cắt nhỏ) dùng công nghệ ép chiết lấy dịch thô. Hỗn hợp thu được khi chưa gia nhiệt có thành phần chính là anacardic acid (có thể lên tới 70%, tùy phương pháp), cardanol và cardol, ngoài ra còn có các vết kim loại, nước và tạp chất khác [1-4]. Việc gia nhiệt sẽ loại bỏ nước, đông tụ keo nhựa cây (lignin) và làm cho nhóm carboxylic (-COOH) trong phân tử anacardic acid bị phá vỡ và chuyển hóa. Khi được gia nhiệt đến nhiệt độ 180°C, hỗn hợp chính thu được sẽ gồm các phenolic tự nhiên dạng lỏng với thành phần chính là cardanol. Sau quá trình gia nhiệt hỗn hợp dịch chiết thô từ vỏ hạt điều thu được (có thể gọi là dịch chiết vỏ hạt điều - cashew nut shell liquid - CNSL) có thành phần chính là cardanol [5]. Về nguyên tắc, các sản phẩm này đã có thể sử dụng làm nhiên liệu lò đốt, tuy nhiên, khi đốt trực tiếp không qua xử lý tinh chế sẽ gây ra nhiều tác hại không mong muốn. Thứ nhất là hư hỏng thiết bị máy móc khi dầu sử dụng lẫn quá nhiều tạp chất, hàm lượng acid và kim loại cao [6], tiếp theo là quá trình cháy và nhiệt lượng không đạt như mong muốn do dầu thu được có hàm lượng nước và độ nhớt quá cao [7]. Ngoài ra, việc tạo ra quá nhiều tạp chất sẽ gây ảnh hưởng tới môi trường, phát thải các khí NO_x, nhất là SO_x gây ô nhiễm môi trường, điều này gây ra tác dụng ngược với mục tiêu đặt ra.

Acid citric là một acid hữu cơ an toàn, ít độc, dễ phân hủy, là tác nhân để tạo phức với kim loại do trong cấu trúc phân tử có ba nhóm cacboxyl (-COOH) và một nhóm hydroxyl (-OH). Do tính dễ phân cực nên acid citric dễ tan trong nước, mặt khác, ngoài tính acid nó còn có tính khử nên hỗ trợ quá trình loại bỏ tạp chất. Việc sử dụng phụ gia acid hữu cơ để xử lý chế biến sâu dịch chiết CNSL được thực hiện bằng quy trình sản xuất tự động liên hoàn, kết hợp sử dụng hệ thống thiết bị cấp liệu có kiểm soát (PLC - Programmable Logic Controller: Bộ điều khiển logic lập trình) là bước cải tiến quan trọng và có tính thực tiễn phù hợp với năng lực đầu tư của doanh nghiệp nhỏ và vừa khi nâng cấp công nghệ đầu tư dây chuyền thiết bị sản xuất. Sau quá trình xử lý đầu (CNSL), thành phẩm thu được và các sản phẩm dầu mỏ (HFO) có thể phối trộn với tỷ lệ thích hợp, bổ sung các phụ gia để tạo ra dầu diesel sinh học (Bio-heavy fuel oil - BioHFO), có thể sử dụng cho động cơ tàu biển theo tiêu chuẩn của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) [8], hay cho các lò hơi các nhà máy nhiệt điện, khu công nghiệp giảm các hỗn hợp SO_x. Bên cạnh đó, tùy thuộc vào nhu cầu của khách hàng, sản phẩm dầu CNSL có thể làm nguyên liệu tinh chế sản xuất cardanol để phục vụ công nghiệp

sơn, epoxy, hay dầu gốc... [2, 5, 7]. Nghiên cứu phát triển công nghệ và sản phẩm dầu CNSL còn hướng tới mục tiêu giảm phát thải khí CO₂ gây hiệu ứng nhà kính [9], tạo giá trị gia tăng thông qua tín chỉ carbon (Carbon Credit) có giá trị cao đủ điều kiện tham gia thị trường carbon trong nước hay quốc tế. Đây chính là nghiên cứu có tiềm năng đóng góp thực tiễn vào cam kết giảm phát thải khí nhà kính và trung hòa carbon đến năm 2050 (Net zero 2050) của Chính phủ Việt Nam với cộng đồng quốc tế.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu

Dịch nước chiết vỏ hạt điều thô (sau đây gọi là mẫu dịch chiết thô) được lấy ngày 14/5/2024 do Công ty TNHH MTV chế biến xuất nhập khẩu Quang Minh, xã Phú Riềng, tỉnh Đồng Nai cung cấp.

Hóa chất acid thử nghiệm làm chất xúc tác là acid citric (C₆H₈O₇).

2.2. Nghiên cứu và lựa chọn tỷ lệ khối lượng xúc tác

Để xác định tỷ lệ xúc tác acid và mẫu CNSL thô (mẫu dịch chiết), chúng tôi tiến hành khảo trộn ở các tỷ lệ khác nhau (bảng 1), sau đó tiến hành thực hiện quy trình chế biến sâu dịch chiết bằng xúc tác trong bình phản ứng thu được hiệu suất cao nhất là 92% ở nhiệt độ 80°C trong vòng 4 giờ. Đầu tiên, đưa dịch chiết vào bình trộn. Tiếp theo, bổ sung chất xúc tác (theo tỷ lệ đã cho ở bảng 1), khuấy trộn với tốc độ 1000 vòng/phút trong bốn giờ. Tiếp tục gia nhiệt và khuấy cho đến khi nhiệt độ đạt 80°C (tăng nhiệt độ giúp phản ứng xảy ra nhanh hơn). Khi quá trình khuấy trộn hoàn tất, dầu CNSL được đưa vào phễu chiết tách, để nguội và lắng trong hai ngày, chiết lấy sản phẩm và lấy một phần đi phân tích chỉ tiêu chất lượng.

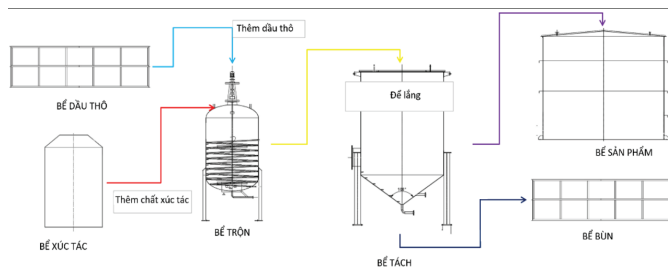
Bảng 1. Tỷ lệ xúc tác acid và mẫu dịch chiết vỏ hạt điều thô.

Thông số	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4
Lượng xúc tác acid citric (C ₆ H ₈ O ₇) (g)	250	400	500	600
Nguyên liệu dịch chiết (g)	5000	5000	5000	5000
Tỷ lệ xúc tác/dịch chiết (%wt)	5	8	10	12
Nhiệt độ phản ứng (°C)	80	80	80	80
Thời gian phản ứng (giờ)	4	4	4	4

2.3. Mô hình công nghệ chế biến sâu dầu vỏ hạt điều ứng dụng làm dầu nhiên liệu

Sau khi xác định được tỷ lệ xúc tác/dịch chiết thô ở quy mô phòng thí nghiệm, chúng tôi đã tiến hành thực

hiện chạy pilot trên hệ thống bình chứa, bể trộn được kỹ sư Hàn Quốc đến từ Công ty TNHH Thương mại và Phát triển Anh Vinh (Việt Nam) và Công ty JY Holding (Hàn Quốc) nghiên cứu và thiết kế [10]. Thiết kế hệ thống được cải tiến theo quy trình công nghệ chia làm 2 nhánh độc lập xử lý từ khâu bơm nguyên liệu, phối trộn xúc tác, gia nhiệt, trộn, ủ, lắng, lọc cặn chân không, thu hồi dầu sản phẩm và cặn chiết được thực hiện độc lập, song song với nhau và được điều khiển bởi hệ thống máy tính PLC. Đây là bước cải tiến về thiết kế cơ khí và sử dụng hệ thống điều khiển tự động để tiến hành sản xuất 24/24 giờ với số lượng nhân công giảm tối đa. Hình 1 là sơ đồ nguyên tắc của hệ thống xử lý, trong đó việc quản lý có thể thực hiện trực tuyến. Như đã đề cập ở trên, việc thay đổi công nghệ này sẽ phù hợp hơn với thực tiễn sản xuất của các doanh nghiệp vừa và nhỏ ở Việt Nam.



Hình 1. Sơ đồ quy trình công nghệ chế biến sâu dịch chiết vỏ hạt điều.

Khi quá trình xử lý được hoàn tất, dầu CNSL được đưa vào bể tách, để nguội và lắng trong 48 giờ, chiết lấy sản phẩm và đem cân để tính hiệu suất, một phần sản phẩm đem đi phân tích chất lượng.

2.4. Phương pháp xác định chỉ tiêu chất lượng

Các phương pháp xác định chỉ tiêu của dầu vỏ hạt điều được thực hiện tại Bộ môn Hóa học, Trường Đại học Mở - Địa chất và Trung tâm Kỹ thuật Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng 3 (QUATEST 3), cụ thể như sau:

- Xác định trị số acid của mẫu trước và sau khi xử lý: Sử dụng phương pháp chuẩn độ điện thế bằng dung dịch KOH 0,1 N trong isopropanol để xác định trị số acid theo tiêu chuẩn của Hiệp hội Vật liệu và Thử nghiệm Hoa Kỳ ASTM D664-18e2 [11].

- Hàm lượng tro được xác định bằng cách nung mẫu tới 775°C trong vòng 20 phút theo tiêu chuẩn ASTM D482-19 [12].

- Hàm lượng tạp chất (sediment) trong mẫu dịch chiết và mẫu dầu sau khi xử lý được xác định theo ASTM D473-22 [13].

- Hàm lượng nước được xác định bằng phương pháp chuẩn độ điện thế Karl Fischer theo ASTM D6304-20 [14];

- Xác định trị số nhiệt lượng bằng bom nhiệt lượng kế theo ASTM D240-19 [15].

- Sử dụng phương pháp huỳnh quang cực tím (UVF) để phân tích hàm lượng lưu huỳnh (S) theo tiêu chuẩn ASTM D5453-19a [16].

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Nguyên liệu dịch chiết thô vỏ hạt điều

Để nghiên cứu và đề xuất giải pháp tối ưu hóa quy trình sản xuất dầu sinh học từ dịch chiết thô vỏ hạt điều, mẫu dịch chiết sản xuất từ xã Phú Riềng, tỉnh Đồng Nai được xác định các giá trị nhiệt lượng, tạp chất, hàm lượng tro và hàm lượng nước. Kết quả được đưa ra trong bảng 2.

Bảng 2. Kết quả phân tích nguyên liệu đầu vào (mẫu dịch chiết thô).

TT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị tính	Phương pháp thử	Tiêu chuẩn (*)	Kết quả
1	Trị số acid	mg KOH/g	ASTM D664-18e2	<25	12,1
2	Hàm lượng tro	% (m/m)	ASTM D482-19	<0,1	1,2
3	Hàm lượng tạp chất	% (m/m)	ASTM D473-22	<0,5	1,84
4	Hàm lượng nước	% (v/v)	ASTM D6304-20	<0,5	1,2
5	Nhiệt lượng	cal/kg	ASTM D240-19	>9300	9295
6	Hàm lượng S	mg/kg	ASTM D5453-19a	<0,5	113

*: mặc dù không có tiêu chuẩn cụ thể cho dầu sinh học sản xuất từ CNSL của Việt Nam, nhưng có thể so sánh chỉ tiêu tương đương của dầu thu được với dầu CNSL cardanol tinh chế dựa theo các tiêu chuẩn quốc tế ASTM (Hiệp hội Vật liệu và Thử nghiệm Hoa Kỳ).

Kết quả bảng 2 cho thấy, ngoài trị số acid thì các chỉ số khác của mẫu dịch chiết vỏ hạt điều đều vượt cao so với tiêu chuẩn tương đương của CNSL cardanol tinh chế như hàm lượng nước và tạp chất đo được là 1,2 và 1,84% vượt quá tiêu chuẩn cho phép <0,5%; hàm lượng tro là 1,2 so với 0,1%, đặc biệt, chỉ số hàm lượng lưu huỳnh của mẫu dịch chiết vượt rất xa so với tiêu chuẩn (113 so với 0,5 mg). Ngoài ra, trị số acid của mẫu thô nằm trong giới hạn cho phép (<25 mg KOH/g), số liệu 12,1 còn khá cao, bởi vì giá trị acid cao (>10) có thể gây ăn mòn, làm giảm tuổi thọ thiết bị, ngoài ra khi gia nhiệt có thể xuất hiện bọt khí. Có thể thấy rằng, mẫu dầu điều thô chứa rất nhiều tạp chất, có khả năng ảnh hưởng tiêu cực đến độ tinh khiết và chất lượng chung của nhiên liệu.

3.2. Nghiên cứu, xác định tỷ lệ xúc tác và dầu

Chúng tôi đã tiến hành phân tích các mẫu dầu thử nghiệm khi sử dụng chất xúc tác với các tỷ lệ khác nhau, kết quả thu được thể hiện trên bảng 3.

Bảng 3. Kết quả phân tích các mẫu thử nghiệm.

TT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị tính	Phương pháp thử	Tiêu chuẩn (*)	Mẫu dịch chiết	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4
1	Trị số acid	mg KOH/g	ASTM D664-18e2	<25	12,1	4,1	5,1	5,92	8,7
2	Hàm lượng tro	% (m/m)	ASTM D482-19	<0,1	1,2	0,45	0,11	0,072	0,02
3	Hàm lượng tạp chất	% (m/m)	ASTM D 473-22	<0,5	1,84	0,15	0,12	<0,01	<0,01
4	Hàm lượng nước	% (v/v)	ASTM D6304-20	<0,5	1,2	0,87	0,75	0,45	0,2
5	Nhiệt lượng	cal/kg	ASTM D 240-19	>9300	9295	9475	9498	9506	9569
6	Hàm lượng S	mg/kg	ASTM D5453-19a	<0,5	113	0,05	0,036	0,02	0,009

Kết quả bảng 3 cho thấy, đối với tất cả các mẫu thử nghiệm, các chỉ tiêu acid, hàm lượng tạp chất và hàm lượng lưu huỳnh giảm rất nhanh và đạt tiêu chuẩn cho phép <0,5 mg, giá trị acid đều <25 mg KOH/g. Ngược lại, sự tăng trị số nhiệt lượng (đều >9300 cal/g) hoàn toàn phù hợp với độ giảm hàm lượng nước. Hàm lượng các chất đều giảm và sự giảm này tỷ lệ với sự tăng tỷ lệ acid/dầu, cụ thể như sau:

- Tỷ lệ 5% (mẫu 1): các chỉ tiêu còn lại là hàm lượng tro (0,45>0,1%) và hàm lượng nước (0,87>0,5%) đều không đạt. Tương tự với tỷ lệ 8% (mẫu 2), hàm lượng tro (0,11>0,1%) và hàm lượng nước (0,75>0,5%) đều không đạt.

- Tỷ lệ 10 và 12% (mẫu 3 và mẫu 4): tất cả các chỉ tiêu đều đạt tiêu chuẩn. Cụ thể, hàm lượng tro (0,072 và 0,02%<0,1%) và hàm lượng nước (0,45 và 0,2%<0,5%) đều nằm trong giới hạn cho phép. Như vậy, cả hai tỷ lệ đều

phù hợp, tuy nhiên với mẫu 3 (tỷ lệ 10%) với chỉ số acid là 5,92 mg KOH/g được chúng tôi ưu tiên lựa chọn để chạy phản ứng trên quy mô pilot.

3.3. Đánh giá kết quả thử nghiệm trên quy mô pilot

Quy trình công nghệ sản xuất dầu vỏ hạt điều hiện nay ở các cơ sở sản xuất trong nước vẫn còn đơn giản, dịch chiết thu được thường có lẫn nhiều tạp chất, khoáng chất, các kim loại và nước. Hàng chủ yếu được xuất khẩu luôn hoặc chỉ xử lý sơ bộ bằng các phương pháp cơ học như lắng và lọc, dù có lợi ích thân thiện với môi trường nhưng do chất lượng thấp nên giá thành rẻ, thường xuyên bị ép giá. Để cải tiến công nghệ và nâng cao chất lượng sản phẩm, bể trộn chất xúc tác hữu cơ, xúc tác nhiệt độ có kiểm soát được sử dụng với mục tiêu giảm hàm lượng kim loại có trong dầu, loại bỏ tạp chất dạng hữu cơ, nâng cao thời gian bảo quản của dầu, qua đó nâng cao nhiệt trị của sản phẩm. Việc đổi mới công nghệ nâng cao chất lượng dầu CNSL là một quá trình khó khăn, phức tạp và đòi hỏi chi phí rất lớn. Với sự hợp tác của doanh nghiệp, đối tác Hàn Quốc và Việt Nam, việc thay đổi thiết kế cơ khí, ứng dụng công nghệ thông tin, số hóa một phần hoạt động quản lý sản xuất, hệ thống sản xuất gồm hai nhánh xử lý độc lập liên hoàn gồm bình chứa, bể trộn xúc tác, bơm khuấy chuyên dụng, bơm hút chân không, bể ủ gia nhiệt và hệ thống quản lý tự động PLC đã được đầu tư thiết kế, chế tạo và lắp đặt (hình 2-4). Đây là quy trình được thiết kế để tương thích với điều kiện sản xuất kinh doanh của doanh nghiệp Việt Nam theo chuỗi cung ứng nguyên liệu sản xuất.



Hình 2. Máy ép vỏ hạt điều trực vít.



Hình 3. Bể trộn.



Hình 4. Bể lắng.



Hình 5. Hình ảnh các mẫu sản phẩm thử nghiệm trên quy mô pilot.

Chúng tôi tiến hành chạy phản ứng trên quy mô pilot với lượng dầu thô nguyên liệu là 1000 kg. Các phản ứng được tiến hành ở nhiệt độ 80°C và khối lượng xúc tác là 100 kg. Hiệu suất sản phẩm đạt được sau khi chiết lấy là 90%, dầu thu được có màu sẫm đen (hình 5).

Hoạt tính xúc tác của các mẫu được đánh giá thông qua kết quả đã được như sau:

Bảng 4. Kết quả phân tích các mẫu thử nghiệm trên quy mô pilot.

TT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị tính	Phương pháp thử	CNSL thô	Kết quả
1	Trị số acid	mg KOH/g	ASTM D664-18e2	12,1	6,1
2	Hàm lượng tro	% (m/m)	ASTM D482-19	1,2	0,089
3	Hàm lượng tạp chất	% (m/m)	ASTM D473-22	1,84	<0,01
4	Hàm lượng nước	% (v/v)	ASTM D6304-20	1,2	0,5
5	Nhiệt lượng	cal/kg	ASTM D240-19	9295	9498
6	Hàm lượng S	mg/kg	ASTM D5453-19a	113	<0,1

Kết quả bảng 4 cho thấy, nếu xét về nhiệt lượng thì mẫu chất lỏng vỏ hạt điều chạy trên quy mô phòng thí nghiệm và quy mô pilot có sự khác nhau không đáng kể lần lượt là 9498 và 9506, tuy nhiên hàm lượng nước mặc dù giảm đi rất nhiều nhưng con số 0,5% vẫn còn khá cao. Điều này có thể giải thích là do hàm lượng nguyên liệu mẫu dịch chiết đưa vào có lượng nước quá lớn, nếu lượng nước lớn hơn có thể cần trải qua thêm bước tách nước. Các chỉ tiêu khác không có nhiều khác biệt so với quy mô phòng thí nghiệm, hàm lượng tro và tạp chất được giảm xuống đáng kể, đáp ứng được tiêu chuẩn dầu CNSL cardanol tinh chế.

4. Kết luận

Sử dụng acid hữu cơ làm xúc tác cho quá trình xử lý CNSL thô cho thấy, hiệu quả loại bỏ tạp chất rất tốt và lưu huỳnh gần như không có trong sản phẩm dầu CNSL. Kết quả chạy pilot không quá khác biệt so với kết quả nghiên cứu tại phòng thí nghiệm, các chỉ tiêu đều đạt tiêu chuẩn: hàm lượng tro là 0,089%<0,1%, giá trị acid 6,1 mg KOH/g<25 mg KOH/g, tạp chất <0,01% và hàm lượng lưu huỳnh <0,1%. Có thể thấy, công nghệ giúp tách loại cặn, tạp chất cơ học, hạn chế phát sinh chất thải rắn, mẫu dầu thu được có thể so sánh với tiêu chuẩn dầu CNSL cardanol tinh chế. Bên cạnh đó, việc sử dụng acid hữu cơ an toàn, có thể phân hủy sinh học để loại bỏ tạp chất cũng đóng góp cho mục tiêu bảo vệ môi trường.

LỜI CẢM ƠN

Xin trân trọng cảm ơn Công ty TNHH Thương mại và Phát triển Anh Vinh (Việt Nam) và Công ty JY Holding (Hàn Quốc) đã giúp đỡ chúng tôi hoàn thành nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S.K. Kyei, O. Akaranta, G. Darko, et al. (2019), "Extraction, characterization and application of cashew nut shell liquid from cashew nut shells", *Chemical Science International Journal*, **28**(3), pp.37-49, DOI: 10.9734/CSJI/2019/v28i330143.
- [2] O.A. Michael, K.O. Joseph, O.O. Olugbenga, et al. (2024), "Studies on Nigerian cashew nut shell liquid: Greening-up extraction process, chemical composition and cost effectiveness", *Sustainable Chemistry for The Environment*, **7**, DOI: 10.1016/j.scenv.2024.100139.
- [3] R.N. Patel, S. Bandyopadhyay, A. Ganesh (2006), "Extraction of cashew (*Anacardium occidentale*) nut shell liquid using supercritical carbon dioxide", *Bioresource Technology*, **97**(6), pp.847-853, DOI: 10.1016/j.biortech.2005.04.009.
- [4] O.I. Sekunowo, G.U. Uduh (2022), "Extraction and physicochemical characterization of cashew nut-shell liquid in metal forming", *Nigerian Journal of Technological Development*, **19**(2), pp.110-115, DOI: 10.4314/njtd.v19i2.2.
- [5] E.G. Nyoni, P.E. Mabeyo, A.J. Kitalika (2025), "Optimising the decarboxylation of anacardic acid by exploring the temperature effects", *Journal of Chemistry*, **2025**(1), DOI: 10.1155/joch/3394111.
- [6] R.Q. Aucelio, R.M. Souza, R.C. Campos, et al. (2007), "The determination of trace metals in lubricating oils by atomic spectrometry", *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **62**(9), pp.952-961, DOI: 10.1016/j.sab.2007.05.003.
- [7] L.A. Michael, T.O. Temilola (2022), "Utilizing cashew nut shell liquid for the sustainable production of biodiesel: A comprehensive review", *Cleaner Chemical Engineering*, **4**, DOI: 10.1016/j.clce.2022.100085.
- [8] International Maritime Organisation (2023), *IMO Strategy on Reduction of Ghg Emissions from Ships*, <https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf>, accessed 6 June 2025.
- [9] S. Park, S. Lee, S.J. Jeong, et al. (2010), "Assessment of CO₂ emissions and its reduction potential in the Korean petroleum refining industry using energy-environment models", *Energy*, **35**(6), pp.2419-2429, DOI: 10.1016/j.energy.2010.02.026.
- [10] J. Won-sang, H. Seung-man, N.H. Cuong (2025), *A Bio Heavy Oil Production Method*, DOI: 10.8080/1020250019996.
- [11] American Society for Testing and Materials (2018), *Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration*, ASTM D664-18e2, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [12] American Society for Testing and Materials (2019a), *Standard Test Method for Ash from Petroleum Products*, ASTM D482-19, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [13] American Society for Testing and Materials (2022), *Standard Test Method for Sediment in Crude Oils and Fuel Oils by The Extraction Method*, ASTM D473-22, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [14] American Society for Testing and Materials (2020), *Standard Test Method for Determination of Water in Petroleum Products, Lubricating Oils, and Additives by Coulometric Karl Fischer Titration*, ASTM D6304-20, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [15] American Society for Testing and Materials (2019b), *Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter*, ASTM D240-19, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [16] American Society for Testing and Materials (2019c), *Standard Test Method for Determination of Total Sulfur in Light Hydrocarbons, Spark Ignition Engine Fuel, Diesel Engine Fuel, and Engine Oil by Ultraviolet Fluorescence*, ASTM D5453-19a, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.