

# ĐÁNH GIÁ THỰC NGHIỆM TÍNH CHẤT VẬT LÝ VÀ HÓA HỌC CỦA DẦU SINH HỌC TỪ QUÁ TRÌNH NHIỆT PHÂN NHANH SINH KHỐI VIỆT NAM

## ASSESSING PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF BIO-OIL IN VIET NAM BIOMASS FAST PYROLYSIS PROCESS

Phạm Duy Vũ<sup>1</sup>, Hoàng Dương Hùng<sup>2</sup>, Trần Văn Vang<sup>1</sup>, Trần Thanh Sơn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng; phamduyvubk@gmail.com

<sup>2</sup>Trường Đại học Quảng Bình; hdhung@gmail.com

**Tóm tắt** - Dầu sinh học từ quá trình nhiệt phân nhanh sinh khối đã và đang được nhiều nhà khoa học trên thế giới nghiên cứu nâng cấp và ứng dụng. Tuy nhiên, ở Việt Nam hiện nay, nghiên cứu các đặc tính của dầu sinh học để tạo cơ sở cho nghiên cứu ứng dụng còn nhiều hạn chế. Trong bài báo này, tác giả thực hiện các phân tích xác định tính chất vật lý và thành phần hóa học của dầu sinh học được tạo ra từ quá trình nhiệt phân nhanh bột gỗ trong lò tầng sôi. Kết quả cho thấy dầu sinh học đáp ứng được các thông số kỹ thuật yêu cầu để làm nhiên liệu đốt công nghiệp theo tiêu chuẩn ASTM D7544-12 của Hoa Kỳ. So với tiêu chuẩn TCVN 6239-2002 FO N03 về dầu FO thì đáp ứng được chỉ tiêu hàm lượng lưu huỳnh, độ nhớt và điểm đông đặc. Kết quả nghiên cứu là cơ sở để nghiên cứu nâng cấp dầu sinh học ở Việt Nam.

**Từ khóa** - sinh khối; nhiệt phân nhanh; lò tầng sôi; dầu sinh học; tính chất vật lý dầu sinh học.

### 1. Đặt vấn đề

Nhiệt phân sinh khối là quá trình phân hủy sinh khối dưới tác động nhiệt trong môi trường không có oxy. Sản phẩm của quá trình nhiệt phân sinh khối là chất khí, rắn và lỏng. Chất khí bao gồm các khí như H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> [2]; các khí này được tái sử dụng lại một phần để cung cấp năng lượng cho quá trình nhiệt phân. Chất rắn là cốc được sử dụng làm than hoạt tính phục vụ trong công nghiệp, đời sống. Sản phẩm mong muốn của quá trình nhiệt phân sinh khối là sản phẩm lỏng, được gọi là dầu sinh học (bio-oil). Thông qua các quá trình xử lý về hóa lý, dầu sinh học sẽ được nâng cấp như một loại nhiên liệu thay thế cho các loại nhiên liệu hóa thạch.

Hiện nay, các kiểu lò thường được sử dụng để thực hiện quá trình nhiệt phân nhanh là: lò tầng sôi, hình nón quay, chân không và ly tâm. Trong đó, kiểu lò tầng sôi có ưu điểm là khả năng trao đổi nhiệt cao, dễ dàng điều chỉnh nhiệt độ và chế tạo. Với những ưu điểm vượt trội này, kiểu lò tầng sôi được nhiều nhà nghiên cứu lựa chọn để nghiên cứu nhiệt phân nhanh. Tuy nhiên, quá trình nhiệt phân trong lò tầng sôi phụ thuộc vào nhiều yếu tố vận hành như kích cỡ hạt nguyên liệu, tốc độ môi chất khí truyền nhiệt, nhiệt độ lò phản ứng, đặc điểm loại nhiên liệu, ... Vì vậy, trong mỗi điều kiện phản ứng tính chất vật lý và thành phần hóa học của dầu sinh học tạo ra cũng phụ thuộc vào điều kiện vận hành.

Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng kết quả nghiên cứu thực nghiệm các điều kiện vận hành tối ưu khi nhiệt phân nhanh bột gỗ trong lò tầng sôi để hiệu quả thu hồi dầu sinh học đạt được giá trị lớn nhất đã được công bố [1]. Theo đó, mẫu dầu sinh học được tạo ra trong điều kiện tối ưu như: nhiệt độ lò phản ứng là 500°C, kích cỡ hạt từ 0,5 đến 1 mm, thời gian lưu sản phẩm khí trong lò nhỏ hơn 2 s,

**Abstract** - Biomass fast pyrolysis using fluidized bed technologies for bio-oil production has been widely researched by scientists. However, there has been very limited research on properties of bio-oil in Vietnam's conditions. In this paper, the bio-oil collected from the experimental studies of wood pulp using fluidized bed technologies is analyzed to determine its physical properties and elemental composition. The results show that the bio-oil produced from wood pulp meets the United States of America's ASTM D7544-12 required specifications for fuel oil used for industrial burners. Compared with the TCVN 6239-2002 FO N03 standards of the fuel oil FO, the bio-oil meets indicators of the sulfur content, kinematic viscosity and solidification point. These research results contribute to orientating the research toward upgrading the bio-oil production in Viet Nam.

**Key words** - biomass; fast pyrolysis; fluidized bed; bio-oil; physical properties of bio-oil.

được đem phân tích các tính chất vật lý và thành phần hóa học theo các tiêu chuẩn cho phép. Kết quả phân tích các đặc tính của dầu sinh học từ quá trình nhiệt phân nhanh là cơ sở để thực hiện nghiên cứu nâng cấp ứng dụng vào trong công nghiệp hoặc sản xuất điện năng.

### 2. Phương pháp nghiên cứu

#### 2.1. Phương pháp phân tích xác định các thành phần hóa học và nguyên tố của sinh khối

Mỗi loại sinh khối có các thành phần hóa học hemicellulose, cellulose, lignin khác nhau. Nó được xác định theo phương pháp Van Soest [4] và phương pháp cân bằng khối lượng. Phương pháp Van Soest dựa vào khả năng chịu được các axit khác nhau của hemicellulose, cellulose và lignin. Theo đó, hemicellulose dễ dàng bị phân giải bởi axit loãng, cellulose sẽ chuyển thành glucose khi đun với axit đậm đặc, lignin có đặc tính không tan trong nước và axit vô cơ.

Các thành phần nguyên tố C, H, O, N trong sinh khối được xác định theo các tiêu chuẩn thể hiện trong Bảng 1.

**Bảng 1.** Các tiêu chuẩn phân tích thành phần nguyên tố của sinh khối

Thành phần nguyên tố	Tiêu chuẩn phân tích
Cacbon (C)	ASTM D5373-08
Hydro (H)	ASTM D5373-08
Nitơ (N)	AOAC 993.13 (2012)
Lưu huỳnh (S)	TCVN 175:1995

#### 2.2. Phương pháp xác định tính chất vật lý và thành phần hóa học của dầu sinh học

Các tính chất vật lý và thành phần nguyên tố hóa học của dầu sinh học phân tích theo các tiêu chuẩn được giới thiệu trong Bảng 2.

**Bảng 2.** Các tiêu chuẩn phân tích tính chất vật lý và thành phần nguyên tố hóa học của dầu sinh học

Chỉ tiêu	Tiêu chuẩn phân tích
Nhiệt trị	ASTM D4809
Độ nhớt	ASTM D445
Ôxy	ASTM 4815
Lưu huỳnh	ASTM D5453
Carbon	ASTM D6866
pH	ASTM E70
Nước	ASTM 6304
Điểm chớp cháy cốc kín	ASTM D.93

Các thông số thể hiện tính chất vật lý của dầu sinh học như nhiệt trị, độ nhớt, hàm lượng pH, nước và điểm chớp cháy là các tính chất cơ bản của nhiên liệu. Dựa vào giá trị của các thông số này, người sử dụng có cơ sở để thực hiện các nghiên cứu tiếp theo để ứng dụng hiệu quả vào từng mục tiêu sử dụng dầu sinh học dần thay thế cho nhiên liệu truyền thống.

Những thông số hàm lượng các nguyên tố hóa học như

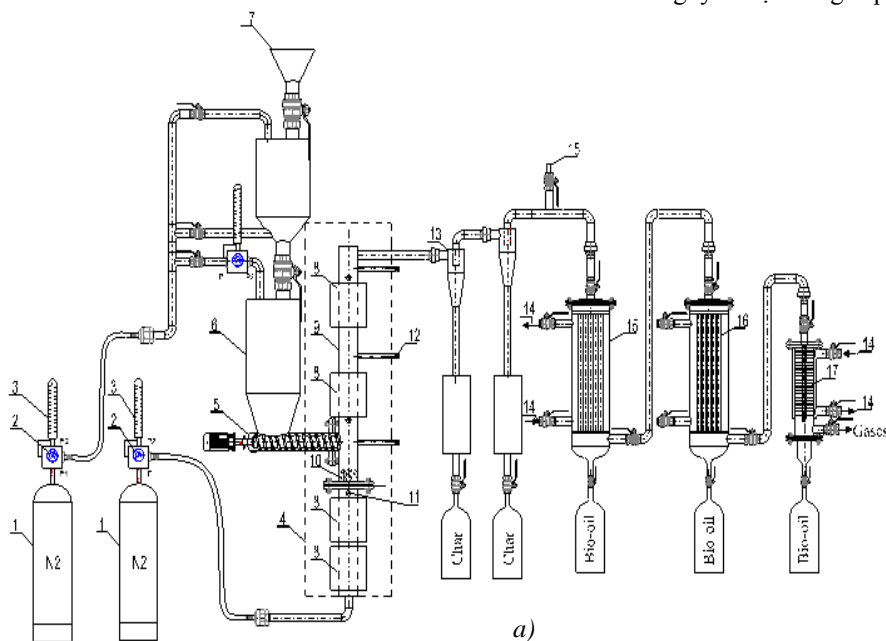
carbon, lưu huỳnh, ôxy cũng là cơ sở cho việc nghiên cứu quá trình cháy nhiên liệu sinh học.

Hơn nữa, để định hướng việc nghiên cứu nâng cấp dầu sinh học cần phải xác định các thành phần hợp chất chính có trong dầu sinh học cũng như các nhóm chức chính. Công việc này được thực hiện trên máy sắc ký khí phổ phổ GCMS ISQ – GC Trace 1300 với thư viện phổ Nist, Wiley.

Ngoài ra, thành phần các khí có trong hỗn hợp khí không ngưng được xác định trực tiếp trên hệ thống thiết bị thí nghiệm. Sử dụng máy GA 2000 Plus phân tích thành phần khí CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>; máy Rasi 900-1 phân tích thành phần các khí hydro carbon.

### 2.3. Mô hình thực nghiệm hệ thống nhiệt phân nhanh sinh khối sản xuất dầu sinh học

Để thực hiện nghiên cứu tính chất vật lý và thành phần hóa học của dầu sinh học từ sinh khối, nhóm nghiên cứu đã thực hiện việc thiết kế, chế tạo hệ thống thiết bị nhiệt phân nhanh thu hồi dầu sinh học trong lò tầng sôi, với công suất nguyên liệu cung cấp là 500 g/h, thể hiện trên Hình 1.



**Hình 1.** a) Sơ đồ nguyên lý hệ thống nhiệt phân nhanh sinh khối trong lò tầng sôi sản xuất dầu sinh học; b) Hệ thống thực nghiệm

1. Bình cấp khí nitơ; 2. Áp kế; 3. Lưu lượng kế; 4. Vật liệu bảo ôn; 5. Vít tải liệu; 6. Bình chứa liệu; 7. Phễu cấp liệu; 8. Điện trở; 9. Lò phản ứng; 10. Ống phun; 11. Sensor áp suất; 12. Sensor nhiệt độ; 13. Cyclone; 14. Nước giải nhiệt; 15, 16, 17. Bình ngưng cấp 1, 2, 3

Sinh khối sau khi sấy đạt đến độ ẩm nhỏ hơn 10 % được nghiền đến kích cỡ yêu cầu và cấp vào lò phản ứng. Tại đây, sinh khối nhận nhiệt từ dòng khí nitơ nóng (nhiệt độ từ 475 – 500°C) và lớp cát phân hủy thành hỗn hợp khí và các chất rắn. Năng lượng dự trữ trong lớp cát làm cho phân bố nhiệt độ phản ứng trong lò đồng đều, hạn chế hình thành nhiệt độ cực đại tại một số vùng trong lò tầng sôi. Quá trình truyền nhiệt cho hạt sinh khối trong lò phản ứng chủ yếu là dẫn nhiệt từ những hạt cát và quá trình trao đổi nhiệt từ dòng khí nitơ. Lượng sinh khối cấp vào lò được điều khiển bằng biến tần. Sinh khối sau khi nhận nhiệt sẽ nhiệt phân thành hỗn hợp cốc cùng với hỗn hợp các khí hữu cơ và vô cơ. Lượng cốc trong hỗn hợp này khi đi qua cyclone sẽ

được phân tách, hỗn hợp khí còn lại sẽ được dẫn qua liên tiếp các thiết bị ngưng tụ. Tại đây, các khí hữu cơ trong hỗn hợp sẽ ngưng thành dầu và chảy xuống phễu chứa, phần khí không ngưng theo ống dẫn thoát ra ngoài.

Các điều kiện vận hành tối ưu của hệ thống để dầu sinh học thu hồi đạt hiệu quả cao nhất đã được công bố ở [1], [3], [5]. Theo đó, nhiệt độ lò phản ứng tối ưu của bột gỗ là 500°C và kích cỡ hạt từ 0,5 đến 1 mm. Dầu sinh học tạo ra từ các điều kiện vận hành này được đem phân tích để xác định tính chất vật lý và thành phần hóa học. Kết quả phân tích là cơ sở cho việc đánh giá khả năng ứng dụng dầu sinh học và định hướng nghiên cứu nâng cấp dầu sinh học để dần thay thế cho nhiên liệu truyền thống.

### 3. Kết quả nghiên cứu

#### 3.1. Xác định thành phần hóa học và thành phần nguyên tố của sinh khối sử dụng thí nghiệm

**Bảng 3.** Thành phần hóa học và nguyên tố của bột gỗ

Tên chỉ tiêu	Giá trị (%)	Tên chỉ tiêu	Giá trị (%)
<b>Thành phần hóa học</b>		<b>Thành phần nguyên tố</b>	
Hemicellulose	20,5	C	47,5
Cellulose	41,5	H	6,8
Ligin	27	N	0,1
		O	44,8
		S	0,1

Sinh khối sử dụng được sử dụng cho nghiên cứu này là bột gỗ. Bột gỗ được nghiền nhỏ, sàng bằng rây tiêu chuẩn có kích cỡ từ 0,5 đến 1 mm và được sấy trong máy sấy Nabertherm đến độ ẩm 7%. Sử dụng các phương pháp đã giới thiệu trong mục 2.1, ta xác định được thành phần hóa học và nguyên tố của mẫu bột gỗ. Kết quả được trình bày trong Bảng 3.

#### 3.2. Xác định tính chất vật lý và thành phần nguyên tố của dầu sinh học

Dầu sinh học thu hồi từ các thí nghiệm trong điều kiện ổn định nhất được đem phân tích tính chất vật lý và thành phần nguyên tố, kết quả được thể hiện trong Bảng 4.

**Bảng 4.** Tính chất vật lý và thành phần nguyên tố của dầu sinh học

Stt	Chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị phân tích	ASTM D7544-12 [7]	TCVN 6239-2002 FO N°3 [2]
1	Nhiệt trị	kJ/kg	16.400	15.000	> 40.964
2	Hàm lượng nước	% kl	19	< 30	< 1
3	Độ nhớt động học (tại 40°C)	mm <sup>2</sup> /s	12,9	< 125	< 380

**Bảng 5.** Thành phần các hợp chất trong dầu sinh học từ bột gỗ

Công thức	Hợp chất	%	Công thức	Hợp chất	%
C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	Furanone	10,2	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	Vanilin	3,8
C <sub>13</sub> H <sub>24</sub> O	Cyclopentanone	1,0	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	Phenol, 2 -methoxy-4-(1propenyl)	1,0
C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	Benzaldehyde	8,8	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	2,5-Dimethoxybenzyl alcohol	7,6
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	Phenol	4,1	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	Phenol, 2 -methoxy-4-propyl	0,6
C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	2-cyclopenten-1 - one	5,2	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3 methoxyphenyl)	2,0
C <sub>8</sub> H <sub>15</sub> NO	2,2,4-Trimethyl-3 hydroxy-n-valeronitrile	2,5	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	Phenol, 2,6 -dimethoxy-4-(2propenyl)	1,3
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	Phenol, 2-methyl	4,2	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>	Benzaldehyde, 4 - hydroxy -3,5 dimethoxy	3,3
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	Phenol, 2-methoxy	8,5	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>	Phenol, 2,6 -dimethoxy-4-(2propenyl)	1,8
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	Phenol, 2, dimethyl	0,9	C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	2-propenal, 3-(4-hydroxy-3 methoxyphenyl)	3,0
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	Phenol, 2-methoxy-4-methyl	2,8	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>	Curvulol	1,4
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	1,2-Benzenediol	3,0	C <sub>9</sub> H <sub>13</sub> NO <sub>2</sub>	2-Oxa-6 azatricyclo[3.3.1(3,7)] decane-6-carboxaldehyde	0,8
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	1,2-Benzenediol, methoxy	0,9	C <sub>10</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>4</sub>	2-cyclohexene-1-acetic acid, 2-nitro, ethyl ester	0,5
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy	0,9	C <sub>11</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>	3,5-Dimethoxy-4 hydroxycinnamaldehydes	2,3
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	Phenol, 2, 6-dimethoxy	9,7	C <sub>14</sub> H <sub>26</sub> O <sub>4</sub>	Hexanedioic acid, mono (2ethylhexyl) ester	1,1
C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	Eugenol	2,3	C <sub>24</sub> H <sub>38</sub> O <sub>4</sub>	Diisooctyl phthalate	4,7

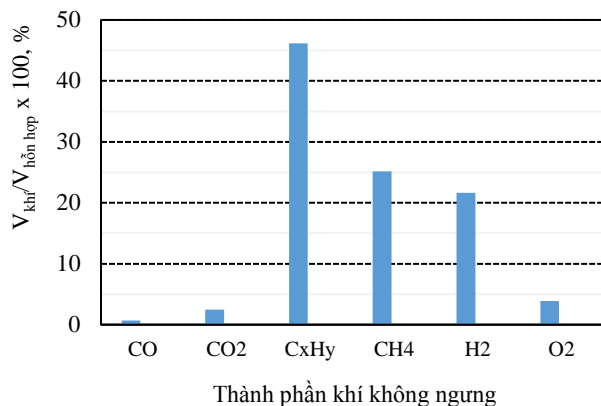
4	Khối lượng riêng (tại 20°C)	kg/d m <sup>3</sup>	1,28	1,1 ÷ 1,3	0,991
5	Điểm chớp cháy cốc kín	°C	> 100	> 45	> 66
6	Điểm đông đặc	°C	< -6	< -9	< 24
7	pH		2,8	-	-
8	Hàm lượng lưu huỳnh	% kl	KPH	< 0,05	3,5
9	Hàm lượng cacbon	% kl	44,3	-	-
10	Hàm lượng hydro	% kl	7,1	-	-
11	Hàm lượng oxy	% kl	48,3	-	-
12	Hàm lượng nitơ	% kl	0,1	-	-



**Hình 2.** Thu hồi dầu sinh học

#### 3.3. Phân tích thành phần hóa học của dầu sinh học

Nhằm định hướng cho việc nghiên cứu nâng cấp dầu sinh học tạo ra từ quá trình nhiệt phân nhanh, tác giả thực hiện phân tích sắc ký khối phổ (GC/MS) xác định các hợp chất có trong dầu sinh học được tạo ra từ quá trình nhiệt phân bột gỗ. Kết quả phân tích được thể hiện trong Bảng 5. Ngoài ra, thành phần các khí trong hỗn hợp khí không ngưng cũng được xác định và thể hiện trong Hình 3.



Hình 3. Thành phần các khí trong hỗn hợp khí không ngưng

#### 4. Bàn luận về kết quả nghiên cứu

Từ kết quả nghiên cứu ta có các nhận xét sau:

- Hiện nay, ở Việt Nam chưa có tiêu chuẩn về dầu sinh học nên ta so sánh kết quả phân tích tính chất vật lý và thành phần nguyên tố của dầu sinh học được tạo ra từ quá trình nhiệt phân bột gỗ với tiêu chuẩn ASTM D7544-12 [4] (tiêu chuẩn này đưa ra các chỉ tiêu của dầu sinh học được sử dụng cho lò đốt công nghiệp của Hoa Kỳ) và tiêu chuẩn chất lượng Việt Nam về nhiên liệu đốt lò (FO) TCVN 6239-2002. Kết quả cho thấy rằng, dầu sinh học tạo ra từ bột gỗ đáp ứng được các thông số kỹ thuật yêu cầu để làm nhiên liệu cho lò đốt công nghiệp của Hoa Kỳ. So với tiêu chuẩn dầu FO thì đáp ứng được chỉ tiêu hàm lượng lưu huỳnh, độ nhớt động học và điểm đông đặc. Như vậy, để sử dụng làm nguồn nhiên liệu cho các động cơ, lò hơi, hệ thống cấp nhiệt phục vụ đời sống, dầu sinh học cần phải nâng cao nhiệt trị và giảm hàm lượng ôxy cùng với giảm hàm lượng nước. Tùy theo mỗi ứng dụng dầu sinh học mà mức độ nâng cấp chất lượng dầu sinh học cũng khác nhau.

- Từ kết quả phân tích sắc ký khối phổ cho thấy dầu sinh học là hỗn hợp phức tạp các chất bị oxy hóa. Các nhóm hợp chất chính trong dầu sinh học được nhiệt phân nhanh từ bột gỗ bao gồm: phenol (40,1 %), aldehydes (21,1 %), ketones (16,5 %), alcohols (11,3 %) và acid (5,8 %). Các nhóm chức này chứa nhiều nguyên tố oxy nên trong dầu sinh học nguyên tố ôxy chiếm khoảng 50 %, đây cũng là nguyên nhân nhiệt trị dầu sinh học thấp. Ngoài ra, nhóm hợp chất acid chiếm đến 5,8 % nên pH trong dầu sinh học

thấp, đây là một trong những nhược điểm chính của dầu sinh học.

- Kết quả phân tích cho thấy thành phần các khí trong hỗn hợp khí không ngưng bao gồm: O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> (x ≥ 2), CO<sub>2</sub> và CO. Trong đó, hàm lượng khí H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> chiếm phần lớn. Dựa trên thành phần này ta có thể đánh giá khả năng tái sử dụng sản phẩm khí không ngưng cho việc cấp năng lượng cho quá trình nhiệt phân nhanh.

#### 5. Kết luận

Dựa trên hệ thống thiết bị nhiệt phân nhanh sinh khối trong lò tầng sôi đã được thiết kế, chế tạo, nhóm tác giả đã thực hiện nghiên cứu thực nghiệm sản xuất dầu sinh học từ bột gỗ. Dầu sinh học được đem phân tích các tính chất vật lý và thành phần hóa học. Kết quả phân tích cho thấy:

- Dầu sinh học tạo ra từ bột gỗ đáp ứng được các thông số kỹ thuật yêu cầu để làm nhiên liệu cho lò đốt công nghiệp của Hoa Kỳ (theo tiêu chuẩn ASTM D7544-12). So với tiêu chuẩn dầu FO thì đáp ứng được chỉ tiêu hàm lượng lưu huỳnh, độ nhớt động học và điểm đông đặc.

- Xác định được thành phần các hợp chất có trong dầu sinh học.

Kết quả của nghiên cứu này là cơ sở cho việc định hướng nghiên cứu nâng cấp dầu sinh học phục vụ các mục tiêu sử dụng trong công nghiệp và sản xuất điện năng.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Phạm Duy Vũ, Hoàng Dương Hùng, Trần Văn Vang, Nguyễn Quốc Huy, "Xác định các yếu tố vận hành ảnh hưởng đến hiệu quả thu hồi dầu sinh học từ quá trình nhiệt phân nhanh sinh khối", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, Số 11(108), Quyển 2, 2016.
- [2] Tổng cục Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng, Bộ Khoa học và Công nghệ, *TCVN 6239: 2002 Nhiên liệu đốt lò (FO) - Yêu cầu Kỹ thuật*, 2002, Việt Nam.
- [3] Bridgewater, A.V., Meier, D., Radlein, D., "An overview of fast pyrolysis of biomass", *Org. Geochem.*, 30, 1999, pp. 1479-1493.
- [4] Goering, H.K and P.J. Van Soest, *Forage Fiber Analyses (apparatus, reagents, procedures and some application)*, U.S. Agricultural Research Service, 1970.
- [5] Q. Xue, D. Dalluge, T.J. Heindel, R.O. Fox, R.C. Brown, "Experimental validation and CFD modeling study of biomass fast pyrolysis in fluidized-bed reactors", *Fuel* 97, 2012, pp. 757-769.
- [6] Qingang Xiong, Soroush Aramideh, Song-Charmg Kong, "Modeling effects of operating conditions on biomass fast pyrolysis in bubbling fluidized bed reactors", *Energy & Fuels*, 27, 2013, pp. 5948-5956.
- [7] <https://www.astm.org/Standards/D7544>

(BBT nhận bài: 28/7/2017, hoàn tất thủ tục phản biện: 23/8/2017)