



# Năng lượng sinh học từ chất thải: Các công nghệ chuyển đổi hiện nay

TS. NGUYỄN THỊ QUỲNH HƯƠNG

Tổ chức Phát triển Hà Lan SNV

TS. NGUYỄN HẢI YẾN

Viện Khoa học Môi trường, Bộ Tài nguyên và Môi trường

*Sau cuộc khủng hoảng năng lượng từ những năm 1970, nhiều quốc gia quan tâm tới việc phát triển sinh khối như một nguồn nhiên liệu thay thế. Tuy nhiên, những năm sau đó, sự quan tâm đến năng lượng sinh học đã giảm đi do sự đột phá công nghệ năng lượng hóa thạch tương đối rẻ. Cuộc khủng hoảng năng lượng toàn cầu sau đại dịch Covid-19 năm 2020, chiến tranh giữa Nga và Ukraina năm 2022 một lần nữa khiến thế giới thực sự nhìn nhận tầm quan trọng của nguồn năng lượng sinh học. Trong bối cảnh ô nhiễm môi trường, gia tăng chất thải và sự nóng lên toàn cầu, năng lượng sinh khối từ chất thải nổi lên như một giải pháp tiềm năng để giải quyết đồng thời vấn đề năng lượng, môi trường và giảm phát thải khí nhà kính. Nguồn sinh khối sẵn có, dư thừa này được xem là nguồn nguyên liệu thay thế để cung cấp năng lượng bền vững trong tương lai. Bài báo giới thiệu bức tranh toàn cảnh về việc áp dụng các công nghệ chuyển đổi chất thải sinh khối thành nhiên liệu sinh học và điện sinh học bao gồm khí hóa, hóa lỏng, nhiệt phân, phân hủy kỵ khí, lên men rượu, sản xuất hydro quang sinh học, phản ứng transester hóa (transesterification), chiết suất chất lỏng siêu tới hạn, đốt cháy và pin nhiên liệu vi sinh vật (MFC).*

## GIỚI THIỆU

Năng lượng sinh học ngày nay chiếm 50% tỷ lệ sử dụng năng lượng tái tạo toàn cầu. Năng lượng sinh học có thể thay thế 25% tổng năng lượng cung cấp trên thế giới đến năm 2050 theo kịch bản của Cơ quan Năng lượng tái tạo quốc tế (IRENA) với năng lực cung cấp là 150 EJ sinh khối hoặc tăng  $\frac{3}{4}$  so với mức độ của năm 2019. Năng lượng sinh học đóng vai trò quan trọng trong giảm phát thải, lưu giữ các-bon hướng tới mục tiêu phát thải ròng bằng 0.

Có ba loại nhiên liệu sinh học là thế hệ thứ nhất, thứ hai và thứ ba. Nhiên liệu sinh học thế hệ thứ nhất như nhiên liệu chuyển đổi từ cây lương thực (như mía, lúa mì, lúa mạch, ngô, khoai tây, đậu tương, hướng dương, dừa), nhiên liệu sinh học thế hệ thứ hai được tạo ra từ vật liệu chứa lignocellulose (tức là cây dầu mè, sắn, cỏ switchgrass, gỗ, rơm) và chất thải sinh khối. Nhiên liệu sinh học thế hệ thứ hai được tạo ra từ sinh khối dư thừa và chất thải như từ ngành nông nghiệp và lâm nghiệp, xây dựng, chất thải công nghiệp, chất thải sinh hoạt (MSW). Đây là giải pháp đầy hứa hẹn nhằm giảm thiểu các vấn đề môi trường liên quan đến phát thải, bằng cách chuyển đổi chất thải từ dạng thải bỏ sang dạng năng lượng sinh học hữu ích. Một loại sinh khối khác có tên là vi tảo, được sử dụng làm nguyên liệu cho nhiên liệu sinh học thế hệ thứ ba. Nguồn nguyên liệu này có tiềm năng cao để sản xuất một lượng lớn chất béo thích hợp cho việc sản xuất dầu diesel sinh học. Ngoài ra, sinh khối phát triển nhanh này có thể được áp dụng trực tiếp để tạo ra nhiều loại nhiên liệu sinh học.

Các công nghệ chuyển đổi chất thải sinh khối thành nhiên liệu sinh học và điện sinh học hiện nay bao gồm khí

hóa, hóa lỏng, nhiệt phân, phân hủy kỵ khí, lên men rượu, sản xuất hydro quang sinh học, phản ứng transester hóa (transesterification), chiết suất chất lỏng siêu tới hạn, đốt cháy, và pin nhiên liệu vi sinh vật (MFC). Nguyên liệu sinh khối bao gồm: Sinh khối dư thừa và chất thải, gỗ, phụ phẩm nông nghiệp, dầu ăn phế thải, sinh khối tảo.

## CÔNG NGHỆ CHUYỂN ĐỔI NĂNG LƯỢNG SINH HỌC

Công nghệ chuyển đổi chất thải thành năng lượng bao gồm chuyển hóa chất thải thành nhiều dạng nhiên liệu có thể cung cấp năng lượng thay thế. Trong những năm gần đây, các kỹ thuật và chuyển đổi chất thải sinh khối thân thiện môi trường sang nhiên liệu hóa học được xem xét như một cách tiếp cận hiệu quả nhằm phát triển năng lượng tái tạo. Có một số công nghệ và quá trình được lựa chọn sẵn có để chuyển đổi năng lượng sinh khối. Ngoài kỹ thuật transester hóa, sự biến đổi của chất thải sinh khối thành năng lượng được thực hiện bằng cách sử dụng hai kỹ thuật chung là chuyển đổi nhiệt hóa và sinh hóa. Chuyển đổi bằng phương pháp nhiệt hóa là sự phân hủy các thành phần hữu cơ trong sinh khối bằng nhiệt trong khi chuyển đổi sinh hóa sử dụng vi sinh vật hoặc enzyme để chuyển đổi sinh khối hoặc chất thải thành năng lượng hữu ích. Chuyển hóa bằng phương pháp nhiệt hóa bao gồm nhiệt phân, khí hóa, hóa lỏng và đốt cháy. Mặt khác, chuyển đổi sinh hóa bao gồm ba quy trình được gọi là phân hủy kỵ khí, lên men rượu và phản ứng quang sinh.

### • Chuyển đổi nhiệt hóa

Chuyển đổi thông qua công nghệ nhiệt hóa liên quan đến quá trình chuyển đổi hóa học ở nhiệt độ cao đòi hỏi



phải phá vỡ liên kết và tái cấu trúc chất hữu cơ thành than sinh học (rắn), khí tổng hợp và dầu sinh học giàu oxy (dạng lỏng). Trong quá trình chuyển đổi nhiệt hóa, có ba lựa chọn là khí hóa, nhiệt phân và hóa lỏng.

#### *Khí hóa*

Kỹ thuật khí hóa bao gồm phản ứng hóa học trong môi trường thiếu oxy. Đây là quá trình đốt nóng sinh khối ở nhiệt độ cao (500 - 1.400°C), trong áp suất khí quyển lên đến 33 bar và điều kiện thiếu oxy hoặc yếm khí để tạo ra khí dễ cháy hỗn hợp. Quá trình khí hóa biến đổi các-bon thành phần thành khí tổng hợp bao gồm hydro, các-bon monoxide, các-bon dioxide, metan, hydrocarbon cao hơn và nitơ với sự có mặt của tác nhân khí hóa, chất xúc tác. Bằng cách sử dụng khí tổng hợp này, các loại năng lượng/chất mang năng lượng được cung cấp như nhiên liệu sinh học, hydro khí đốt, khí biomethane, nhiệt, năng lượng và hóa chất. Đây là kỹ thuật hiệu quả trong sản xuất khí hydro từ sinh khối và được coi là con đường tự nhiên độc lập dựa trên cân bằng năng lượng, lý tưởng để chuyển đổi đa dạng nguyên liệu sinh khối khác nhau từ chất thải nông nghiệp, công nghiệp, nhà bếp, thực phẩm, trang trại.

#### *Hóa lỏng*

Hóa lỏng và nhiệt phân sinh khối là hai kỹ thuật tạo ra sản phẩm dưới dạng dầu sinh học hoặc dầu thô sinh học. Quá trình hóa lỏng nhiệt hóa liên quan đến việc sản xuất dầu sinh học ở nhiệt độ thấp và áp suất cao có hoặc không có chất xúc tác với sự có mặt của hydro. Hóa lỏng thủy nhiệt hay còn gọi là nhiệt phân hydro là phương pháp sử dụng nước ở nhiệt độ trung bình từ 250 - 374°C và áp suất vận hành từ 40 - 220 bar để chuyển đổi sinh khối thành dầu sinh học. Nói chung, phương pháp hóa lỏng thủy nhiệt sử dụng sinh khối có độ ẩm cao để có thể giảm thiểu chi phí cho giai đoạn làm khô hoặc tách nước. Do đó, các nguyên liệu có chứa hàm lượng độ ẩm khác nhau, chẳng hạn như sinh khối gỗ, chất thải và sinh khối từ tảo đều phù hợp để sản xuất dầu sinh học.

#### *Nhiệt phân*

Nhiệt phân là quá trình phân hủy sinh khối bằng nhiệt diễn ra trong điều kiện không có oxy với nhiệt độ hoạt động trong khoảng từ 350 - 550°C, có thể đạt tới 700°C. Quá trình nhiệt phân phân hủy các chất hữu cơ thành hỗn hợp rắn, lỏng và khí. Sự khác biệt giữa khí hóa và nhiệt phân là quá trình khí hóa tạo ra khí nhiên liệu có thể đốt cháy để tạo nhiệt. Trong khi đó, quá trình nhiệt phân tạo ra nhiên liệu lỏng được gọi là dầu nhiệt phân (dầu sinh học) có thể thay thế cho dầu nhiên liệu trong ứng dụng sưởi ấm tĩnh hoặc trong sản xuất điện. Ưu điểm của nhiên liệu lỏng được sản xuất bằng phương pháp nhiệt phân so với nhiên liệu khí của quá trình khí hóa, là sản lượng thu được dầu sinh học có thể được lưu trữ trực tiếp và vận chuyển dễ dàng. Hiện nay, việc sản xuất chất lỏng từ quá trình nhiệt phân nhanh được quan tâm nhiều hơn do những lợi thế về năng suất cao của dầu sinh học lên đến 75% trọng lượng và chi phí hiệu quả cao về năng lượng, thân thiện với môi trường.

Việc ứng dụng năng lượng hydro được các quốc gia phát triển chủ yếu trong lĩnh vực giao thông. Trên toàn cầu đã bán được 2 triệu xe điện cá nhân sử dụng pin nhiên liệu hydro các loại trong năm 2016. Ngoài ra, hydro còn được phát triển phục vụ nhu cầu nhiệt năng. Tại Nhật Bản, mục tiêu kết nối 1,4 triệu hệ thống năng lượng đồng phát vào năm 2020, đạt khoảng 5,3 triệu vào năm 2030 tại các cơ sở công nghiệp và thương mại, hướng tới thay thế dần hệ thống đường ống dẫn khí thiên nhiên bằng ống dẫn khí hydro trong tương lai. Anh và Ôxtrâyliya cũng đã có những nghiên cứu và kế hoạch thay thế nguồn nhiên liệu sưởi ấm từ khí thiên nhiên sang hydro.

#### **• Chuyển đổi sinh hóa**

Chuyển đổi sinh hóa bao gồm việc sử dụng men hoặc men vi khuẩn chuyên biệt để chuyển đổi sinh khối hoặc chất thải thành năng lượng hữu ích. Các lựa chọn quy trình cổ điển là phân hủy kỵ khí, lên men rượu và kỹ thuật quang sinh dẫn đến các loại nhiên liệu sinh học khác nhau được sản xuất.

#### *Phân hủy kỵ khí*

Trong quá trình phân hủy kỵ khí, sinh khối chất thải được chuyển đổi thành khí sinh học bởi các vi sinh vật và khí sinh học chứa chủ yếu là  $CH_4$  và  $CO_2$  với một lượng nhỏ  $H_2S$ . Khí sinh học có hàm lượng năng lượng từ 20 - 40% nhiệt trị thấp hơn của sinh khối. Phân hủy kỵ khí có thể chứa sinh khối ướt với độ ẩm lên đến 90%. Hầm biogas được sử dụng phổ biến trong xử lý chất thải chăn nuôi với hàm lượng chất hữu cơ cao, khí sinh học thu được sử dụng cung cấp cho mục đích đun nấu, phát điện, sưởi ấm đã và đang là giải pháp hiệu quả tại nhiều quốc gia nông nghiệp trên thế giới.

Trung Quốc là quốc gia dẫn đầu châu Á về ứng dụng công nghệ biogas ở quy mô hộ gia đình và trang trại. Hiện nay, hơn 60% các cơ sở sản xuất khí đốt sinh học nằm ở châu Âu và Bắc Mỹ. Riêng châu Âu, có khoảng 20.000 cơ sở, phần lớn ở Đức. Tiềm năng khí sinh học ở châu Âu có thể lên đến 1.350 TWh do có sẵn nguồn nguyên liệu để phân hủy lớn. Pháp và Italia hiện được xem là hai nước có thể dẫn đầu trong tương lai về lĩnh vực này. Đối mặt với cuộc khủng hoảng năng lượng, khí sinh học và biometan chiếm ưu thế, để phát triển hơn so với khí hydrogen, do giá thành rẻ hơn. Tuy nhiên, việc sản xuất năng lượng từ các loại cây lương thực là một vấn đề nan giải trong bối cảnh khủng hoảng an ninh lương thực. Chuyển đổi năng lượng từ chất thải là một lĩnh vực tiềm năng.

#### *Quá trình lên men rượu*

Ethanol sinh học có thể thu được thông qua quá trình lên men rượu của sinh khối dư thừa có chứa đường lên men được chuyển đổi từ các thành phần cellulose và hemicellulose của sinh khối dưới sự tồn tại của nấm men hoặc vi khuẩn. Các phương pháp thủy phân phổ biến nhất sử dụng axit/kiềm và enzyme. Xử lý axit rẻ và nhanh, nhưng môi trường axit có thể biến đổi đường thành các dạng không mong muốn. Ngược lại, xử lý bằng enzym



hiệu quả và không tạo ra các sản phẩm phụ không mong muốn, nhưng enzym đắt và chậm hơn. Rượu thô (10 - 15% ethanol) được sản xuất phải trải qua bước cô đặc bằng cách chưng cất. Phần cặn rắn còn lại vẫn có thể được xử lý thành các sản phẩm có giá trị bằng phương pháp hóa lỏng, khí hóa hoặc nhiệt phân có hỗ trợ vi sóng.

#### *Sản xuất hydro bằng quang sinh học*

Một số sinh khối như vi tảo có khả năng tự nhiên tạo ra khí  $H_2$  khi có ánh sáng. Trong quá trình quang hợp, vi tảo biến đổi các phân tử nước thành  $O_2$  và  $H^+$ . Enzym hydroase sau đó khử  $H^+$  thành khí  $H_2$  trong điều kiện kỵ khí.  $O_2$  được giải phóng trong quá trình quang hợp nhanh chóng ức chế các enzyme hydroase và làm gián đoạn quá trình giải phóng khí  $H_2$ . Điều kiện kỵ khí là cần thiết cho việc nuôi cấy vi tảo để sản xuất khí  $H_2$ . Có hai phương pháp chính để chiết xuất  $H_2$  quang hợp bằng vi tảo. Phương pháp đầu tiên là sản xuất đồng thời khí  $O_2$  và  $H_2$  với sự có mặt của ánh sáng. Các electron được tạo ra từ quá trình oxy hóa các phân tử nước được sử dụng bởi các enzyme hydroase để tạo ra khí  $H_2$ . Về mặt lý thuyết, phương pháp này có năng suất cao hơn so với phương pháp thứ hai, nhưng quá trình sản xuất  $H_2$  nhanh chóng bị ức chế bởi quá trình sản xuất  $O_2$ . Cách tiếp cận thứ hai là sử dụng hệ thống hai giai đoạn, trong đó giai đoạn đầu tiên là nuôi cấy vi tảo trong điều kiện bình thường và giai đoạn thứ hai là thúc đẩy quá trình tạo  $H_2$  liên tục trong điều kiện kỵ khí và thiếu lưu huỳnh.

#### **• Phản ứng transester hóa (transesterification)**

Việc sử dụng sinh khối tiềm năng như sinh khối xenlulô để sản xuất nhiên liệu sinh học phức tạp hơn vì tính chất và hiệu suất của dầu chiết xuất cần được điều chỉnh để phù hợp với đặc tính của nhiên liệu dựa trên hydrocacbon. Thách thức nằm ở việc chuyển đổi dầu và chất béo thu được từ các sinh khối này thành nhiên liệu sinh học phù hợp để sử dụng hiệu quả thay thế cho nhiên liệu thông thường. Nhiên liệu sinh học thu được từ sinh khối như vật liệu lignocellulose thường có vấn đề về độ nhớt cao, sức sống thấp và các đặc tính không hòa hòa. Những vấn đề này có thể được giải quyết thông qua một số phương pháp tiền xử lý trong đó phương pháp khả thi nhất là chuyển hóa ester. Transester hóa là phản ứng trong đó chất béo và dầu được chuyển đổi để tạo thành este và glycerol với sự có mặt của chất xúc tác. Các đặc tính vật lý của metyl este của axit béo (FAME) được tạo ra sau đó sẽ tương đương với nhiên liệu dầu mỏ thương mại và sản phẩm phụ glycerol cũng có giá trị thương mại.

#### **• Phương pháp chất lỏng siêu tới hạn**

Chiết xuất chất lỏng siêu tới hạn (SFE) là một quy trình chiết xuất sử dụng carbon dioxide siêu tới hạn ( $SC-CO_2$ ) làm dung môi. Kỹ thuật chiết xuất  $SC-CO_2$  là một công cụ có giá trị để tăng năng suất và tính chọn lọc trong quá trình chiết xuất các hợp chất hữu cơ từ thực vật. SFE có ít lợi ích so với các phương pháp chiết xuất thông thường bao gồm tính chọn lọc cao hơn, thời gian xử lý ngắn hơn và sử dụng các dung môi không độc hại.

#### **• Chuyển đổi sinh khối thành điện sinh học**

Sản xuất năng lượng sinh học ở dạng điện sinh học từ nguyên liệu tái tạo là một phần của công nghệ năng lượng quang phổ. Việc chuyển đổi đất nông nghiệp và rừng thành nguyên liệu sinh khối để phát điện và sưởi ấm khu vực đang phát triển như một dạng năng lượng sinh học tiềm năng. Điện sinh học có thể được sản xuất chủ yếu thông qua quá trình đốt cháy nguyên liệu lignocellulose thu được từ các nguồn sinh khối như sản phẩm và chất thải nông nghiệp, rừng trồng, chất thải của nhà máy cưa và rừng nguyên sinh. Sản xuất điện từ các hệ thống sản xuất nông nghiệp và lâm nghiệp hiện tại được sử dụng đã đóng góp khoảng 15% tổng sản lượng điện của Úc, trong đó việc nâng cấp lên các công nghệ thế hệ thứ nhất có thể tăng sản lượng điện lên 9%. Các hệ thống sản xuất năng lượng cũng có khả năng giảm thiểu khoảng 28% lượng điện và 9% lượng phát thải quốc gia.

Các ngành nông nghiệp và lâm nghiệp có khả năng cung cấp 10-20% lượng điện tiêu thụ trong tương lai ở Mỹ, nơi phần lớn nguyên liệu sinh khối sẽ thu được thông qua cây năng lượng và phụ phẩm cây trồng. Ước tính mức giảm phát thải khí nhà kính là khoảng 27 triệu tấn  $CO_2$  trong thời gian 15 năm. Bên cạnh đó, triển vọng sản xuất phụ phẩm cây trồng trong sản xuất điện sinh học ở Trung Quốc cũng đóng một vai trò quan trọng trong lợi ích năng lượng sinh học toàn cầu. Nguồn cung cấp năng lượng sinh học linh hoạt từ dòng chất thải đô thị tại Amsterdam với khoảng 1.400 tấn/ngày có thể tạo ra năng lượng tái tạo cho thành phố. Những phân tích này đóng vai trò hỗ trợ hoạch định chính sách trong việc khai thác tiềm năng sản xuất năng lượng sinh học từ sinh khối sẵn có tại địa phương để đóng góp vào hệ thống điện bền vững.

### **THÁCH THỨC HIỆN TẠI VÀ TRIỂN VỌNG TƯƠNG LAI**

Thực tiễn cho thấy, có nhiều công nghệ chuyển đổi chất thải thành năng lượng sinh học. Sử dụng chất thải được cho là quy trình kinh tế nhất để sản xuất năng lượng tái tạo, cùng với lợi ích xử lý chất thải. Một lượng đáng kể sinh khối dư thừa và chất thải được tạo ra từ các ngành khác nhau trên khắp thế giới và đây là nguyên liệu đầy hứa hẹn cho năng lượng sinh học nếu các công nghệ hiệu quả và khả thi về mặt kinh tế được phát triển. Tuy nhiên, có một số hạn chế đối với xử lý sinh khối dư thừa và chất thải là vấn đề cạnh tranh về chi phí so với nhiên liệu hóa thạch. Trên thực tế, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra việc sử dụng chất thải rắn sinh hoạt để sản xuất năng lượng sinh học không mang lại lợi nhuận kinh tế do chi phí cao của công nghệ đốt, khí hóa và nhiệt phân. Năng lượng cao cần thiết cho quá trình tiền xử lý chất thải, tinh chế nhiên liệu sinh học được sản xuất, thiết lập thiết bị nhà máy, vận hành và bảo trì lò phản ứng, có thể hạn chế tính thương mại hóa các công nghệ biến chất thải thành năng lượng sinh học. Vì vậy, việc tối ưu hóa quy trình này đang là trọng tâm nghiên



cứu hiện nay nhằm tăng năng suất sản xuất và hiệu quả quy trình.

Ở mức độ nào đó, việc thực hiện phương pháp biến chất thải thành năng lượng sinh học sẽ giúp cải thiện môi trường bằng cách giảm lượng chất thải tại các bãi chôn lấp. Tuy nhiên, quá trình xử lý chất thải thành năng lượng sinh học có thể dẫn đến việc giải phóng các sản phẩm phụ không mong muốn và có hại vào khí quyển. Ví dụ, việc phát thải các chất hữu cơ vi lượng như furan, điôxin polychlorin hóa, chì, thủy ngân và cadmium có thể là do thiết kế không phù hợp và/hoặc vận hành kém hệ thống đốt chất thải rắn sinh hoạt để phát điện. Các giải pháp kiểm soát đầy đủ quá trình trộn và gia nhiệt của không khí/nhiên liệu và các khu vực “làm nguội” trong lò được áp dụng. Tuy nhiên, cần tiếp tục phát triển một công nghệ kiểm soát tốt hơn. Việc phát thải khí độc hại cần được xem xét khi lựa chọn công nghệ biến chất thải thành năng lượng sinh học. Chẳng hạn, lò đốt thường tạo ra lượng chất ô nhiễm cao hơn so với quá trình phân hủy kỵ khí. Phân hủy kỵ khí có thể là một lựa chọn tối ưu để chuyển đổi chất thải rắn sinh hoạt có độ ẩm cao nếu nhu cầu năng lượng nhiệt thấp và công nghệ

sạch hơn là cần thiết. Cuối cùng, việc phân loại rác đúng cách cũng không kém phần quan trọng để đảm bảo hiệu quả thu hồi năng lượng cao hơn trong sản xuất điện và giảm thiểu tác động đến môi trường.

## KẾT LUẬN

Sinh khối dư thừa và chất thải sinh khối có thể được chuyển đổi thành nhiên liệu và điện sinh học bằng cách sử dụng các con đường chuyển hóa este, nhiệt hóa và sinh hóa. Việc lựa chọn quy trình công nghệ phụ thuộc vào sản phẩm cuối cùng mong muốn và nguyên liệu. Nói chung, công nghệ nhiệt hóa sử dụng nhiệt có thể không nhanh và hiệu quả với thành phần chất thải sinh khối khi so sánh với các phương pháp sinh hóa để sản xuất nhiên liệu sinh học. Tuy nhiên, việc sản xuất nhiên liệu sinh học từ chất thải sinh khối vẫn được coi là mạnh mẽ hơn trong công nghệ xử lý và chuyển đổi nhiên liệu. Tuy nhiên, các nghiên cứu đang và sẽ được triển khai để cải thiện những bất cập của các công nghệ hiện có và nâng cao hiệu quả, tính kinh tế của các công nghệ sản xuất trong tương lai ■

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Dhyani V, Bhaskar T. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renew Energy*. 2018;129:695-716. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.035>.
2. Bridgwater AV. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass Bioenergy*. 2012;38:68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
3. Jahirul M, Rasul M, Chowdhury A, Ashwath N. Biofuels production through biomass pyrolysis -a technological review. *Energies*. 2012;5:4952-5001. <https://doi.org/10.3390/en5124952>
4. Brennan L, Owende P. Biofuels from microalgae-a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renew Sust Energ Rev*. 2010;14:557-77. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>.
5. Cantrell KB, Ducey T, Ro KS, Hunt PG. Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities. *Bioresour Technol*. 2008;99:7941-53. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.061>
6. Bibi R, Ahmad Z, Imran M, Hussain S, Ditta A, Mahmood S, et al. Algal bioethanol production technology: a trend towards sustainable development. *Renew Sust Energ Rev*. 2017;71:976-85. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.126>.
7. Ghirardi M. Microalgae: a green source of renewable H<sub>2</sub>. *Trends Biotechnol*. 2000;18:506-11. [https://doi.org/10.1016/S0167-7799\(00\)01511-0](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(00)01511-0)
8. Azevedo ABA d, Mazzafera P, Mohamed RS, de MSABV, Kieckbusch TG. Extraction of caffeine, chlorogenic acids and lipids from green coffee beans using supercritical carbon dioxide and co-solvents. *Brazilian J Chem Eng*. 2008;25:543-52. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000300012>.
9. Farine DR, O'Connell DA, John Raison R, May BM, O'Connor MH, Crawford DF, et al. An assessment of biomass for bioelectricity and biofuel, and for greenhouse gas emission reduction in Australia. *GCB Bioenergy*. 2012;4:148-10. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01115.x>.
10. Tan ST, Ho WS, Hashim H, Lee CT, Taib MR, Ho CS. Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia. *Energy Convers Manag*. 2015;102:111-20. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.010>.
11. Ruth LA. Energy from municipal solid waste: a comparison with coal combustion technology. *Prog Energy Combust Sci*. 1998;24:545-64. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(98\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(98)00011-2).
12. He J, Lin B. Assessment of waste incineration power with considerations of subsidies and emissions in China. *Energy Policy*. 2019;126:190-9. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.025>.