

## مروری بر میکروجلبک‌ها و زیست‌توده‌ها

صادق احمدی  
دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک  
دانشگاه تهران

غیاث‌الدین رحیمی\*  
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک  
دانشگاه محقق اردبیلی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۲۰

### چکیده

امروزه با توجه به کاهش منابع انرژی فسیلی و بالابودن هزینه‌های آن طی دهه‌های اخیر، توجه به یافتن جایگزینی مناسب و پاک برای منابع انرژی فسیلی افزایش چشمگیری یافته است. از جمله این منابع، که قابلیت کاربردی شدن را دارد، استفاده از زیست‌توده برای تولید سوخت‌های زیستی است. سوخت‌های زیستی از محصولات کشاورزی یا ضایعات برجای مانده از آنها، زباله‌های شهری و حتی فاضلاب‌ها استحصال می‌شود. این سوخت‌ها از این نظر که مواد گیاهی مورد استفاده در آنها دی‌اکسید کربن موجود در هوا را جذب کرده و پس از احتراق دوباره همان را به هوا باز می‌گرداند، پاک محسوب می‌شوند و از این نظر که دوباره قابلیت پرورش دادن را دارند تجدیدپذیرند. در بین این مواد، استفاده از مواد خوراکی خود سبب از بین رفتن مواد غذایی می‌شود و توجیه‌پذیری آن را کاهش می‌دهد. از جمله مواد گیاهی پیشنهادی استفاده از جلبک‌هاست که در بسیاری از نقاط جهان قابلیت پرورش دارند و با ویژگی‌های خواص خود می‌توانند جایگزین مناسبی برای انواع دیگر زیست‌توده‌ها باشند. در این مقاله به معرفی میکروجلبک‌ها و روش‌های متنوع فراوری آنها، همچنین انواع سوخت‌های زیستی حاصل از زیست‌توده‌ها پرداخته می‌شود.

**واژگان کلیدی:** انرژی تجدیدپذیر، انرژی پاک، زیست‌توده، سوخت زیستی

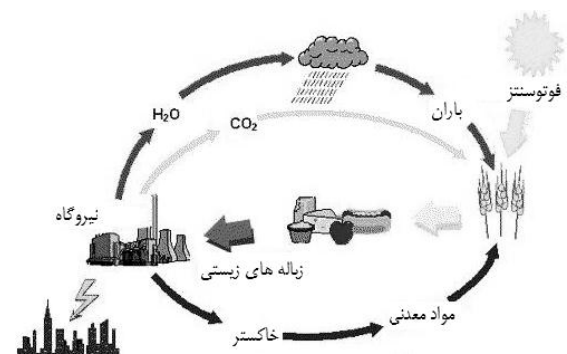
### ۱. مقدمه

اهمیت ویژه‌ای یافته است. با نگاهی به مصرف سوخت و انرژی در دنیا مشخص می‌شود که روند مخربی در قبال منابع انرژی در جریان است. بنابراین می‌توان بیش از پیش نیاز فوری و مهم به استفاده از منابع انرژی جایگزین و تجدیدپذیر را درک کرد [۱]. در میان انرژی‌های تجدیدپذیری که امروزه برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی

امروزه یکی از چالش برانگیزترین چالش‌های فراروی بشر کاهش منابع انرژی فسیلی و یافتن جایگزینی مناسب برای آنهاست. از طرفی، آلودگی محیط زیست و گرم شدن کره زمین توجه همگان را به سمت منابع تجدیدپذیر انرژی جلب کرده است. با توجه به مسائل اقتصادی و مباحث مربوط به امنیت انرژی، تنوع بخشی به منابع انرژی و پایداری آن



مطرح هستند، توجه روزافزونی به زیست‌توده به‌عنوان یک منبع در دسترس معطوف شده است. زیست‌توده یک منبع تجدیدپذیر انرژی است که از مواد زیستی به‌دست می‌آید. مواد زیستی شامل موجودات زنده یا بقایای آنهاست. نمونه‌هایی از این مواد شامل گیاهان، چوب و زباله‌های شهری می‌باشد. زیست‌توده شامل مواد زیستی قابل احتراق هم می‌شود، اما شامل مواد زیستی مانند سوخت‌های فسیلی که طی فرایندهای زمین‌شناختی تغییر شکل یافته‌اند نمی‌شود. وقتی گیاهان رشد می‌کنند، کربن مورد نیاز خود را از جو دریافت می‌نمایند و بعد از احتراق همان کربن را به جو بازمی‌گردانند و بدین ترتیب اثر مخربی بر جو ندارند و از نظر تولید کربن خنثی محسوب می‌شوند. نکته مهم در این مورد اینکه اگرچه سوخت‌های فسیلی ریشه در زیست‌توده در زمان‌های بسیار قدیم دارند، اما چون کربن موجود در آنها از چرخه زیستی طبیعی خارج شده است و سوزاندن آنها تعادل دی اکسید کربن موجود در جو را برهم می‌زند، عنوان زیست‌توده به آنها اطلاق نمی‌شود. زیست‌توده از نظر دسترسی و فراوانی چهارمین منبع موجود در جهان به‌شمار می‌رود [۲] و همین امر تأییدی بر کاربردی بودن استفاده از آن است. در شکل ۱ چرخه سوخت زیستی نمایش داده شده است.



شکل ۱. چرخه سوخت زیستی

زیست‌توده‌ها را می‌توان به سه نسل متنوع تقسیم‌بندی کرد: نسل نخست شامل استفاده از محصولات کشاورزی و گیاهی غذایی مانند نیشکر و مواد دارای نشاسته همانند

ذرت است که به‌دلیل مشکلات ناشی از کمبود مواد غذایی جای خود را به نسل دوم داده‌اند. نسل دوم شامل مواد گیاهی باقی‌مانده از فعالیت‌های کشاورزی و همین‌طور زباله‌های زیستی شهری مانند لینگو سلولوزیک<sup>۲</sup> بیواتانول است [۳]. سوخت‌های زیستی مانند بیواتانول، بیوبوتانول و بیودیزل، که از جلبک‌ها در ابعاد بزرگ و بسیار کوچک حاصل می‌شوند، به‌عنوان نسل سوم سوخت‌های زیستی شناخته می‌شوند [۴].

## ۲. میکروجلبک‌ها

میکروجلبک‌ها سرعت رشد زیادی داشته و به‌دلیل جذب بالای کربن، ذخیره مناسبی از آن در اختیار دارند. میکروجلبک‌ها کاربردهای تجاری متنوعی دارند، اما از دید سوخت زیستی می‌توانند به شکل جامد، مایع و گاز مورد استفاده قرار گیرند. برای استفاده از میکروجلبک‌ها در تولید انرژی زیستی می‌توان از روش‌های تبدیل مستقیم، تبدیل شیمیایی، تبدیل زیست شیمیایی و نهایتاً تبدیل ترموشیمیایی استفاده کرد. با تبدیل مستقیم تنها حرارت حاصل می‌شود، حال آنکه در سایر حالات سوخت زیستی به‌دست می‌آید. برای میکروجلبک‌های جامد انرژی موجود در آنها با سوزاندن قابل استفاده است. برعکس سوخت‌های زیستی لینگوسلولوزیک، که ترکیبات آنها سلولوز، همی‌سلولوز و لیگنین<sup>۳</sup> هستند، میکروجلبک‌ها به‌شکل عمده از پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و لیپیدها تشکیل شده‌اند. لیپیدهایی که در سلول‌های میکروجلبک‌ها وجود دارند زیادند و می‌توانند استخراج شده، با فرایندی خاص به بیودیزل تبدیل شوند که در اصل همان تبدیل از نوع شیمیایی است.

در تبدیل زیست شیمیایی نیز به‌طور مثال بیواتانول و بیوبوتانول از تخمیر میکروجلبک‌ها و متان و هیدروژن با فرایند هضم ناهوازی حاصل می‌شوند [۵]. تبدیل ترموشیمیایی نیز شامل موارد زیر است:

۱. خشک‌سازی

۲. مایع‌سازی

۳. تجزیه حرارتی

۴. گازسازی

در بین روش‌های معرفی شده، استفاده از روش تبدیل ترموشیمیایی به نسبت سایر روش‌های تبدیلی زیست‌توده‌ها به سوخت زیستی ساده‌تر و کاربردی‌تر است. مثلاً در تبدیل شیمیایی ابتدا زیست‌توده باید جداسازی و خالص شود و یا در فرایند تخمیر به چند روز زمان نیاز دارد. در ادامه به بررسی فرایندهای گوناگون در تبدیل ترموشیمیایی پرداخته می‌شود.

## ۲-۱. خشک‌سازی

احتراق ساده‌ترین راه استفاده از انرژی نهفته در زیست‌توده است. ارزش حرارتی بالای برای هر سوخت معیاری از کاربردی بودن آن در صنعت است. مقدار ارزش حرارت بالایی برای زیست‌توده لیگنوسلولوزیک ۱۵ تا ۲۰، برای ذغال ۲۰ تا ۳۵ و برای میکروجلبک‌ها ۱۴ تا ۲۴ مگاژول بر کیلوگرم است. این مقدار برای میکروجلبک‌ها نسبت به ذغال پایین‌تر و تنها کمی بیشتر از زیست‌توده‌های لیگنوسلولوزی است. این مطلب به این شکل تبیین می‌شود که درصد جرمی کربن موجود در میکروجلبک‌ها بین ۳۷ تا ۵۳ درصد از جرم زیست‌توده را شامل می‌شود، اما این قابلیت را دارد که همراه با ذغال برای تولید مورد استفاده قرار بگیرد و به این ترتیب مقدار گازهای گلخانه‌ای سانس شده کاهش یابد. در خشک‌سازی با حرارتی بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و در فشار محیط به مدت ۱۰ تا ۹۰ دقیقه مقدار رطوبت موجود در زیست‌توده را بخار کرده و آن را به شکل خشک درمی‌آورند. با حرارت زیست‌توده ۴ مرحله اتفاق می‌افتد [۶]. در دمای بین ۲۵ تا ۲۰۰ درجه، هیدروژن‌زدایی اتفاق می‌افتد. در دمای ۲۰۰ تا ۴۳۰ درجه عمل تجزیه پروتئین و کربوهیدرات‌ها بر اثر حرارت و کربن‌زدایی صورت می‌پذیرد. در مراحل سوم و چهارم نیز به ترتیب در دماهای ۴۳۰ تا ۵۳۰ درجه اثرگذاری روی

لیپیدها و در دماهای ۵۳۰ تا ۸۰۰ درجه نیز عمل از دست دادن کربن به‌طور آهسته ادامه پیدا می‌کند. به این ترتیب با جداسدن هیدروژن و پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها مقدار کربنی که حاصل می‌شود غنای بیشتری خواهد داشت. دما و مدت زمان عمل خشک‌سازی هر دو بر نتیجه کار اثرگذار هستند؛ در این بین اثر مورد اول بیشتر است. عمل خشک‌سازی می‌تواند مقدار ارزش حرارتی را برای حالتی که ۲۰/۴۶ است به ۲۵/۹۲ افزایش دهد [۷].

## ۲-۲. مایع‌سازی

عمل مایع‌سازی عبارت است از فرایندی حرارتی برای تبدیل میکروجلبک‌های تر در فشار بالای آب به سوخت زیستی. این فرایند در دمای ۳۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵ تا ۲۰ مگاپاسکال رخ می‌دهد. مقدار میکروجلبک‌ها در مخلوط مورد استفاده ۵ تا ۵۰ درصد است. دلیل بالا بودن فشار، نگاه داشتن آب در حالت مایع است. همچنین این فرایند در حدود ۵ تا ۶۰ دقیقه طول می‌کشد. امکان استفاده از کاتالیست نیز برای تسریع فرایند نیز وجود دارد. وقتی میکروجلبک‌ها در آب داغ قرار گیرند، لیپیدها، پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها تجزیه (هیدرولیز) شده و به‌صورت روغن‌های زیستی<sup>۵</sup> و اجزای جامد و گازی مجدداً ترکیب می‌شوند. در مراحل اول مایع‌سازی عمل تجزیه و سپس اجزای ریز واکنشی عمل ترکیب را انجام می‌دهند. روغن زیستی ماده‌ای سیاه‌رنگ و لزج است و چگالی انرژی بالایی دارد. مقدار ارزش حرارتی بالایی برای روغن زیستی ۳۰ تا ۵۰ مگاژول بر کیلوگرم است که مقدار آن برای نفت (حدود ۴۳ مگاژول بر کیلوگرم) می‌باشد. دمای فرایند، زمان، ماده اولیه و وجود کاتالیست هر کدام بر نتیجه کار تاثیرگذارند [۸] که از ذکر جزئی‌تر آن خودداری می‌شود.

## ۲-۳. تجزیه حرارتی

در تجزیه حرارتی میکروجلبک‌ها با استفاده از حرارت در راکتوری که دارای دمای بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد

و در فشار معمولاً یک اتمسفر از هم گسیخته می‌شوند. دما در تجزیه حرارتی ممکن است در صورت استفاده از کاتالیست در حدود ۳۰۰ و یا در حین واکنش تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در تغییر باشد. همچنین مدت زمان انجام فرایند نیز بر نتیجه نهایی تأثیرگذار است. محصولات این فرایند ذغال، روغن‌های زیستی و گازهایی است که شامل متان، هیدروژن، دی اکسید کربن و مونوکسید کربن می‌باشند. پایداری محصولات حاصل از میکروجلبک‌ها نیز از لینگوسلولوزیک‌ها بیشتر است. در دماهای کمتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد، که نرخ انتقال حرارت کند است، معمولاً ذغال زیستی به دست می‌آید. در دماهای بالاتر، که نرخ انتقال حرارت نیز سریع می‌باشد، محصولات به شکل گاز هستند. در دماهای بین این دو مقدار نیز روغن زیستی حاصل می‌شود [۹-۱۰].

## ۲-۴. گازسازی

در فرایند گازسازی مواد کربن‌دار به مونوکسید کربن، دی اکسید کربن، هیدروژن، متان و سایر گازهای قابل احتراق تبدیل می‌شوند. دمای این فرایند معمولاً بیش از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و مقدار اکسیژن در آن کنترل شده است. از مزایای محصولات می‌توان به امکان احتراق در دماهای بالاتر اشاره کرد که با افزایش دمای منبع گرم‌کاری میکروجلبک‌ها که در حضور اکسیژن صورت می‌گیرند شامل خشک‌کردن آنها در دماهای بیش از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشارهای تا ۱۰ بار است [۱۱]. این فرایندها به انرژی زیادی برای خشک‌کردن رطوبت میکروجلبک‌ها نیاز دارند. در روش‌های فوق بحرانی، در دما و فشار زیر نقطه بحرانی آب فرایند گازسازی صورت می‌گیرد [۱۲].

## ۳. سوخت‌های زیستی حاصل از جلبک‌ها

میکروجلبک‌ها در محیط‌های آبی رشد می‌کنند و نرخ رشد آنها سریع‌تر از گیاهان روی خشکی است. مقدار روغن

حاصل از آنها در طول سال برای هر هکتار ۲۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ لیتر است. در برخی از نقاط این مقدار به ۱۰۰۰۰۰ لیتر می‌رسد. تحقیقات نشان می‌دهد که تا ۶۰ درصد از وزن میکروجلبک می‌تواند به شکل روغن زیستی به دست آید که به دلیل پرورش آنها در محیط‌های آبی و برخورداری از آب فراوان دی اکسید کربن و مواد معدنی لازم است. سوخت‌های متفاوتی از میکروجلبک‌ها حاصل می‌شود.

## ۳-۱. هیدروژن

برای نخستین بار در سال ۱۹۳۹ م مشاهده شد که میکروجلبک‌ها گاهی به جای تولید اکسیژن، برای زمان کوتاهی هیدروژن تولید می‌کنند [۱۳]. در سال ۱۹۹۹ م نیز معلوم شد که نبود سولفور و اکسیژن در کنار میکروجلبک سبب تولید هیدروژن می‌شود. برای تولید هیدروژن به طور عمده سه روش وجود دارد: یکی روش زیست شیمیایی است که در آن تحت شرایطی خاص و کنترل شده میکروجلبک به هیدروژن و اکسیژن شکافته می‌شود. در این فرایند آنزیم‌های موجود در سلول نقش کاتالیست را برای شکافته شدن مولکول‌های آب ایفا می‌کنند. روش دیگر، که برای تولید هیدروژن از آن استفاده می‌شود، گازسازی است که قبلاً تشریح شد. در این فرایند معمولاً مخلوطی از گازها تولید می‌شود که هیدروژن و مونوکسید کربن فراورده‌های اصلی هستند. این فرایند تحت حرارت و فشار و در حضور بخار و مقدار کنترل شده‌ای اکسیژن صورت می‌گیرد و به این ترتیب هیدروژن از سایر گازها جدا می‌شود. در روش دیگر برای تولید هیدروژن با تخمیر میکروجلبک متان تولید می‌شود. برای این کار در دماهای بالا در حدود ۷۰۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و در حضور یک کاتالیست فلزی بخار با متان، مونوکسید کربن و هیدروژن تولید می‌شود [۱۴].

## ۳-۲. روغن گیاهی و بیودیزل

باتوجه به رشد تقاضا برای بیودیزل و با عنایت به اینکه استفاده از مواد غذایی برای تولید بیودیزل توجیه‌پذیر نیست،



عملاً بهترین کار استفاده از میکروجلبک است [۱۵]. روغن حاصل از میکروجلبک‌ها این قابلیت را دارد که به‌طور مستقیم مصرف و یا برای تولید بیودیزل استفاده شود. در استفاده مستقیم، هرچند انرژی برای تبدیل به بیودیزل صرف نمی‌شود، برای سوخت موتورهای دیزل مناسب نیست. به همین دلیل نیاز است که در زمینه سازگار کردن بیودیزل و مناسب‌سازی موتور دیزل با آن کار بیشتر صورت گیرد.

### ۳-۳. بیوبوتانول

زباله‌های باقی‌مانده از گرفتن روغن میکروجلبک می‌تواند به‌عنوان ماده‌ای برای تولید بیوبوتانول استفاده شود. چگالی بیوبوتانول نزدیک به بنزین و بالاتر از متانول و یا اتانول است. بیوبوتانول می‌تواند به‌جای بنزین در موتورهای بنزینی معمولی به‌کار رود که مصرفی تقریباً برابر با بنزین دارد. با ترکیب بنزین و بیوبوتانول عملکرد موتور بهتر می‌شود [۱۶].

### ۳-۴. بیوگاز و بیواتانول

بیوگاز از تجزیه بقایای حیوانات و گیاهان و در حضور مقادیر اندک اکسیژن در طبیعت حاصل می‌شود. بیوگاز به‌طور عمده شامل متان و دی‌اکسید کربن است که جزء

### ۵. مآخذ

گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شوند و به همین دلیل عدم ورود آنها به اتمسفر یک حسن محسوب می‌شود. بیوگاز را می‌توان برای مصارف انرژی جهت‌دهی و به‌کار گرفت. بیواتانول نیز از معروف‌ترین سوخت‌های زیستی است و از گیاهان حاصل می‌شود و همانند بیوبوتانول همراه با بنزین به‌عنوان سوخت مورد استفاده قرار گیرد [۱۷].

### ۴. نتیجه‌گیری

امروزه با توجه به کمبود منابع انرژی‌های فسیلی و همچنین آلاینده‌گی ناشی از مصرف آنها نیاز به سایر منابع برای رفع این مشکلات کاملاً احساس می‌شود. در این میان سوخت‌های زیستی به‌عنوان یکی از این منابع تجدیدپذیر و پاک مطرح هستند. مسائلی که برای رشد جایگاه این نوع انرژی وجود دارد نیاز به سرمایه‌گذاری در بخش زیست‌توده مورد نیاز و دیگری فناوری‌های مورد نیاز در فرایند تبدیل زیست‌توده به سوخت زیستی است. همچنین باید به این نکته توجه داشت که محصولات باید به‌صورت کاربردی قابلیت استفاده برای سوخت در صنعت را داشته باشند و یا با فرایندهای این مناسب‌سازی روی سوخت زیستی و یا مصرف‌کننده‌های آن صورت گیرد.

- [1] Misra, R., V. Bansal, G. Das, J. Mathur, T. Aseri. "Thermal performance investigation of hybrid earth air tunnel heat exchanger." *Energy and Buildings*, Vol. 49, 2012, pp. 531-535.
- [2] Wu, K.T., C.J. Tsai, C.S. Chen, H. W. Chen. "The characteristics of torrefied microalgae." *Appl. Energy* 100, 2012, pp. 52-57.
- [3] Naik, S.N., V. V. Goud, P. K. Rout, A. K. Dalai. "Production of first and second generation biofuels: a comprehensive review." *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 2010. pp. 578-597.
- [4] Chen, C.Y., K. L. Yeh, R. Aisyah, D. J. Lee, J. S. Chang. "Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review." *Bioresour. Technol.* 102, 2011. pp. 71-81.
- [5] Spolaore, P., C. Joannis-Cassan, E. Duran, A. Isambert. "Commercial applications of microalgae." *J. Biosci. Bioeng.* 101, 2006, pp. 87-96.

- [6] Chen, W.H., Z. Y. Wu, J. S. Chang, Isothermal and non-isothermal torrefaction characteristics and kinetics of microalga *Scenedesmus obliquus* CNW-N.” *Bioresour. Technol.* 155, 2014. pp. 245-251.
- [7] Wu, K. T., C. J. Tsai, C. S. Chen, H. W. Che. “The characteristics of torrefied microalgae.” *Appl. Energy* 100, 2012, pp. 52–57.
- [8] Brown, T. M., P. Duan, P. E. Savage. “Hydrothermal liquefaction and gasification of *Nannochloropsis*.” *Energy Fuels* 24, 2010, pp. 3639-3646.
- [9] Suali, E., R. Sarbatly. “Conversion of microalgae to biofuel.” *Renewable Sustainable Energy Rev.* 16, 2012, pp. 4316–4342.
- [10] Akhtar, J., N. Saidina Amin. “A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis.” *Renewable Sustainable Energy Rev.* 16, 2012, pp. 5101–5109.
- [11] Khoo, H.H., C. Y. Koh, M. S. Shaik, P. N. Sharratt. “Bioenergy co-products derived from microalgae biomass via thermochemical conversion-life cycle energy balances and CO<sub>2</sub> emissions.” *Bioresour. Technol.* 143, 2013, pp. 298–307.
- [12] Amin, S. “Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae.” *Energy Convers. Manage.* 50, 2009, pp. 1834–1840.
- [13] Mellis, A., T. Happe. “Trials of green alga hydrogen research-from *Hans gaffron* to new frontiers.” *advances in photosynthesis and respiration*. Netherlands: Springer, 2009.
- [14] Xu J, G. F. Froment. “Methane steam reforming,” methanation and water-gas shift: I. Intrinsic kinetics. *AIChE J* 1989(35), pp. 88–92 .
- [15] Benemann, J., W. Oswald. “Systems and Economic Analysis of Microalgae Ponds for Conversion of CO<sub>2</sub> to Biomass”, Final Report submitted to the US Dept. of Energy. Pittsburgh Energy Technology Center; 1996.
- [16] Hirano A, R. Ueda, S. Hirayama, Y. Ogushi. “Carbon dioxide fixation and ethanol production with microalgal photosynthesis and intracellular anaerobic fermentation.” *Energy* 1997, pp. 137-42.
- [17] Kifayat Ullah, Mushtaq Ahmad, Sofia, Vinod Kumar Sharma, Pengmei Lu, Muhammad Zafar, Shazia Sultana, Adam Harvey. “Assessing the potential of algal biomass opportunities for bioenergy Industry: A review.” *Fuel* 143, 2015, pp. 414-423.

بی نوشت

- 
1. biomass
  2. lignocellulosic
  3. lignin
  4. high heat value
  5. bio-oil

