



## بریکت و پلت، سوخت جامد از زیست‌توده، منابع جایگزین انرژی

نسبیه محمدی<sup>۱\*</sup>، الیاس افرا<sup>۲</sup>

۱-دانشجوی دکتری، صنایع خمیر و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان

۲-دانشیار، صنایع خمیر و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان

\*مگ‌گمان، ۴۹۱۵۶۷۶۵۷۵، [mohamadi.nasibe@gmail.com](mailto:mohamadi.nasibe@gmail.com)

### چکیده

استفاده از زیست‌توده به هدف انرژی در مسیر تأمین پایدار انرژی و در پاسخ به افزایش تقاضای انرژی می‌تواند راهکار مؤثری باشد. سوخت زیستی با کاهش مؤثر انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی از پیامدهای گرمایش جهانی که امروزه نگرانی اصلی کشورهای جهان است می‌کاهد. بریکت‌ها و پلت‌ها به عنوان سوخت‌های جامد زیستی مستقیم‌ترین راه استفاده از انرژی منابع زیستی هستند زیرا به‌جای تیمارهای پیچیده ترمو شیمیایی و زیست‌شیمیایی تنها نیاز به فرآیند متراکم سازی دارند. فرآیند تولید بریکت و پلت سوختی، متراکم کردن با اعمال فشار و دما است که منجر به تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک و افزایش دانسیته در زیست‌توده می‌شود. همچنین دانسیته انرژی و دوام سوخت جامد تولیدی زیاد می‌شود. ایجاد پل‌های جامد بین ذرات و درهم‌رفتگی مکانیکی بین ذرات تا رسیدن به دانسیته اجزای آن، مکانیسم احتمالی پیوند ذرات است. اندازه‌گیری ویژگی‌های ذاتی ذرات مانند میزان خاکستر، مواد فرار، کربن ثابت و ارزش حرارتی که مؤثر بر احتراق هستند با آنالیزهای گروهی و نهایی انجام می‌شود. همچنین بریکت و پلت‌های سوختی به لحاظ کیفی با ویژگی‌هایی مثل دانسیته، دوام و ارزش حرارتی سنجیده می‌شوند. احتراق سوخت جامد، مراحل اتلاف جرمی خشک شدن، مواد فرار زدایی و احتراق زغال را متحمل می‌شود. مشکل عمده سوخت‌های جامد زیستی، میزان خاکستر بیشتر نسبت به زغال سنگ و در نتیجه رسوب گرفتگی و خوردگی تجهیزات است لذا پژوهش‌های مختلف می‌توانند در جهت کاهش مشکلات مربوط به خاکستر متمرکز شوند.

**کلید واژگان:** سوخت جامد، بریکت، پلت، متراکم کردن، خاکستر زیست توده

## Briquettes and pellets, Solid fuels from biomass, Alternative energy sources

Nasibeh Mohammadi<sup>1</sup>, Elyas Afra<sup>2</sup>

1,2- Department of wood and paper, University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran

\*P.O.B. 4915676575 Gorgan, Iran, [mohamadi.nasibe@gmail.com](mailto:mohamadi.nasibe@gmail.com)

Received: 28 January 2019 Accepted: 12 September 2019

### Abstract

Using of biomass for energy purpose in the path of sustainable energy supply and in response to increasing energy demand can be an effective solution. Biofuel reduces global warming impacts, which is today the main concern of the countries of the world by lowering greenhouse emissions and dependency of fossil fuels. Briquettes and pellets, as solid biofuels, are the most direct way of using energy from biological sources, because they only need a densification process instead of complex thermochemical and biochemical treatments. Densification process by applying pressure and temperature produces fuel briquettes and, which results in elastic and plastic deformations in biomass, increases density in biomass. Moreover energy density and durability in produced solid fuel increases. Creation of solid bridges between particle and mechanical interlocking, to density of its components, is a possible mechanism of particle bonding. Proximate and ultimate analyses can be used to measurement of intrinsic properties of particles such as ash content, volatile matter, fixed carbon, and heating value that can deeply affect on combustion process. Also, fuel briquettes and pellets are qualitatively measured with properties such as density, durability and calorific value. Combustion of solid fuels involves drying mass loss stages, devolatilization and combustion of char. The major problem of solid biofuels is the amount of ash in comparison with coal, which results in fouling and corrosion on equipment. However, different researches can focus on reducing ash problems.

**Key words:** Solid fuel, Briquettes, Pellets, Densification, Biomass ash

## ۱- مقدمه

ماده‌ای که در اثر تغییرات (معمولاً شیمیایی)، تولید انرژی کند را سوخت می‌گویند که از لحاظ فیزیکی به سه حالت جامد، مایع و گاز در طبیعت وجود دارد. منابع انرژی به دو دسته تجدید ناپذیر و تجدید پذیر تقسیم می‌شوند. زغال‌سنگ، نفت، گاز طبیعی و دیگر سوخت‌های فسیلی و انرژی هسته‌ای از سوخت‌های تجدید ناپذیر هستند که در مقابل آن سوخت‌های تجدید پذیر مانند اتانول زیستی، سوخت جامد زیستی و گاز زیستی (بیومتان) بوده که از زیست‌توده سنتز شده‌اند [۱].

توسعه مداوم فعالیت‌های صنعتی و رشد جمعیت جهان، منجر به افزایش تقاضای انرژی گردیده و پیش‌بینی می‌شود تقاضای انرژی تا سال ۲۰۲۵، پنجاه درصد افزایش یابد. امروزه تقریباً ۸۰ درصد از انرژی مصرفی جهان از طریق سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود. این درحالی است که آلاینده‌ها، گرمایش جهانی و تغییرات زیست‌محیطی به دنبال آن و پایان‌پذیری انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی، کشورها را به‌منظور توسعه منابع انرژی جایگزین به چالش کشیده است.

در مسیر تأمین پایدار انرژی همراه با کاهش مؤثر انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، انتظار می‌رود که استفاده از زیست‌توده به هدف انرژی (انرژی زیستی) نقش اساسی و مهمی را ایفا کند. زیست‌توده منبع تجدیدپذیر انرژی، به‌طور بالقوه پایدار و دوستدار محیط‌زیست است که از گیاهان زنده، کود حیوانی، محصولات ضایعاتی حاصل از صنایع فرآوری و دیگر منابع بیولوژیکی مشتق می‌شود. تولید جهانی زیست‌توده در حدود ۱۴۶ میلیارد مترمکعب تخمین زده شده است. انرژی زیست‌توده به‌عنوان یکی از انواع انرژی‌های تجدید پذیر، چهارمین منبع عظیم انرژی در جهان بعد از زغال‌سنگ، نفت و گاز است که تقریباً ۱۴ درصد از مصرف انرژی را در سال ۲۰۱۴ به خود اختصاص داده است [۳،۲].

منابع اصلی مواد زیست‌توده‌ای را می‌توان به دو نوع تقسیم کرد: ضایعات جنگلی و ضایعات کشاورزی. به‌طور کلی، ضایعات جنگلی بهتر از ضایعات کشاورزی عمل می‌کنند. با این حال با توجه به رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای مواد غذایی، ضایعات کشاورزی را یک منبع مهم انرژی زیستی معرفی می‌کنند. حجم عظیمی از پسماندهای کشاورزی و پسماندهای حاصل از فرآوری چوب به‌طور کامل استفاده می‌شوند نمی‌شوند. هرچند محصولاتی وجود دارند که بازده پسماند کم و زیاد دارند اما منطقی است که حدود ۲۵ درصد از هر نوع ماده اولیه کشاورزی به‌عنوان پسماند فرض شود. در کشورهای در حال توسعه محصولاتی مانند برنج، ذرت، پنبه و گندم بیشترین میزان پسماند را تولید می‌کنند.

مواد اولیه زیست‌توده‌ای شامل مقدار عظیمی انرژی هستند که این انرژی می‌تواند از طریق فرآیند احتراق یا تبدیل زیست‌توده به شکل محصولات انرژی قابل استفاده مانند متان، دیزل، اتانول و بریکت/پلت‌های سوختی بازیابی شود. بریکت‌ها و پلت‌ها به‌عنوان سوخت‌های جامد زیستی ساده‌ترین و مستقیم‌ترین راه برای استفاده از انرژی منابع زیستی هستند زیرا آن‌ها فقط نیاز به فرآیند متراکم کردن<sup>۵</sup> به‌جای تیمارهای پیچیده ترمو شیمیایی و زیست‌شیمیایی دارند. پسماندهای صنایع فرآوری مانند باگاس حاصل از نیشکر،

پوست بادام‌زمینی، سبوس قهوه، سبوس برنج، خاکاره و ضایعات صنایع مبلمان می‌توانند تبدیل به بریکت شوند. انرژی خالص زیست‌توده از محدوده MJ/Kg ۲۰ برای ماده خشک گیاهی تا MJ/kg ۵۵ برای متان در مقایسه با MJ/Kg ۲۷ برای زغال‌سنگ است [۴].

تجارت جهانی سوخت‌های جامد زیستی در سال ۲۰۱۱ به‌جز زغال چوب، در حدود ۱۸ میلیون تن گزارش شده است. در کشورهای در حال توسعه مانند چین، هند، سریلانکا، فیلیپین و کشورهای آفریقایی تولید حرارت خانگی و پخت‌وپز که با سوخت‌های جامد زیستی کار می‌کنند، از محبوبیت بیشتری برخوردار است. در بخش کاربردهای نیروگاهی ظرفیت تولید برق از زیست‌توده تا پایان سال ۲۰۱۱ برابر ۷۶ گیگاوات بوده که این رقم در سال ۲۰۱۰ برابر ۶۶ گیگاوات بوده است. این ظرفیت با کمک تکنولوژی‌های احتراق مستقیم و احتراق همراه<sup>۶</sup> و با کمک منابع سوخت‌های جامد زیستی، بایوگاز و سوخت‌های زیستی مایع بوده که در بین منابع ذکر شده، سوخت‌های جامد زیستی دارای بیشترین سهم (۸۳٪) در تأمین انرژی بوده‌اند. کشورهای برتر دنیا در این زمینه آمریکا، آلمان، سوئد، انگلستان، برزیل، چین، هند و ژاپن می‌باشند. به‌عنوان مثال تقریباً دوسوم برق تولیدی اروپا از سوخت جامد زیستی توسط آلمان با سهمی برابر ۱۷،۶ درصد از کل است [۵]. در ایران نیز در راستای دستیابی به توسعه پایدار اقدامات مهمی در توسعه منابع انرژی تجدید پذیر انجام گردیده است. در این خصوص در سال ۱۳۹۲ ظرفیت نیروگاهی تجدید پذیر (آبی، بادی، خورشیدی و بیوگاز) جهت تولید برق ۱۰۲۸۳/۱ مگاوات گزارش شده که ۰/۶۸ درصد از انرژی مصرفی کل کشور را شامل می‌شود [۶]

## ۲- مکانیسم اصلی تولید بریکت و پلت سوختی - متراکم کردن

زیست‌توده دانسیته حجمی پایینی دارد که این مسئله سبب مشکلات عمده در ذخیره‌سازی، جابجایی و حمل‌ونقل برای فرآوری بعدی می‌شود. کمترین دانسیته مربوط به کاه و باگاس حدود  $40 \text{ Kg/m}^3$  و بیشترین سطوح دانسیته حدود  $250 \text{ Kg/m}^3$  برای پسماندهای چوبی است.

متراکم کردن به فرآیندی اشاره می‌کند که با اعمال فشار از دانسیته حجمی ماده لیگنوسلولوزی می‌کاهد و شکل آن را برای کاربردهای زیست انرژی بعدی مناسب می‌سازد. فرآیندهای متراکم کردن زیست‌توده به بریکت کردن، پلت سازی، قرص ساز<sup>۸</sup>، اکسترودر پیچی<sup>۹</sup>، پرس قرصی<sup>۱۰</sup> و کلوخه ساز<sup>۱۱</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند. برای کاربردهای سوخت جامد پلت سازی و بریکت کردن از رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده هستند که با یک پیستون پرس یا پرس پیچی انجام می‌شوند.

از مزایای مکانیکی بریکت کردن می‌توان افزایش دانسیته حجمی مواد، حمل‌ونقل آسان‌تر و ارزان‌تر، افزایش مقدار انرژی به ازای هر واحد حجمی ماده، به دست آمدن یک محصول همگن از مخلوط ناهمگن مواد و مقدار انرژی یکنواخت به ازای هر واحد از احتراق ماده اولیه را برشمرد [۷].

## ۱-۲- سیستم‌های متراکم کردن

۱-۱-۲- ماشین پلت<sup>۱۴</sup>

پلت سازی یک تکنیک فرآوری عمومی در تولید خوراک دام و همچنین سوخت است. در اصطلاح ساده، پلت کردن، ترکیبات آسیاب شده خیلی ریز را به پلت های متراکم و بادوام تبدیل می‌کند. فرآورده پلت سوختی ویژگی‌های یکنواختی

<sup>۸</sup>cuber  
<sup>۹</sup>screw extruder  
<sup>۱۰</sup>tablet press  
<sup>۱۱</sup>agglomerator  
<sup>۱۲</sup>piston press  
<sup>۱۳</sup>screw press  
<sup>۱۴</sup>pellet mill

combustion  
<sup>۱</sup>briquette  
<sup>۲</sup>pellet  
<sup>۳</sup>solid biofuel  
densification process  
<sup>۴</sup>direct firing  
<sup>۵</sup>co-firing



دماهای بالای مورد استفاده در بریکت سازی مؤثرتر است. در اثر فشار، رطوبت تشکیل بخار می‌دهد و همی سلولز و لیگنین را به کربوهیدرات‌های با وزن مولکولی کمتر هیدرولیز می‌کند و در نتیجه فرآورده‌ها فرآورده‌های لیگنینی، پلیمرهای قندی و دیگر مشتقات تشکیل می‌شوند. این فرآورده‌ها، زمانی که در معرض گرما و فشار قالب قرار می‌گیرند، به‌عنوان چسب عمل می‌کنند و ذرات را به هم متصل می‌کنند. افزودن گرما به سست شدن الیاف زیست‌توده کمک می‌کند و ساختار آن را نرم می‌کند. بریکت‌های تولید شده با استفاده از پرس هیدرولیکی، شکل و اندازه یکنواخت دارند و معمولاً به شکل استوانه‌های ۴۰\*۴۰ میلی‌متر و دارای دانسیته‌های واحد در محدوده ۸۰۰-۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب هستند [۷].

### ۳- مکانیسم‌های پیوند ذرات طی متراکم کردن

برای دستیابی به زیست‌توده متراکم شده با کیفیت خوب، برخی متغیرهای فرآیندی مثل قطر قالب، دمای قالب، فشار بکار رفته برای فشردگی ذرات و حضور یا عدم حضور چسباننده باید در نظر گرفته شوند. فشردگی ذرات زیست‌توده منجر به تغییر شکل الاستیک و پلاستیک ذرات در فشارهای بالا می‌شود. دو فاکتور مهم که در طی فرایند باید در نظر گرفته شود شامل توانایی ذرات برای تشکیل سوخت جامد با مقاومت مکانیکی خوب و توانایی فرایند در پهنه کردن دانسیته است [۹].

مانی و همکاران سه فاز عکس‌العمل زیست‌توده را طی متراکم کردن مشخص کردند: در فاز اول، ذرات خودشان را برای تشکیل یک توده محکم و فشرده جمع می‌کنند که اکثر آن‌ها ویژگی‌های خود را حفظ می‌کنند و به دلیل اصطکاک بین ذرات و اصطکاک ذرات به دیواره انرژی آزاد می‌شود. در مرحله دوم، ذرات در برابر یکدیگر فشرده می‌شوند و دستخوش تغییر شکل پلاستیک و الاستیک می‌گردند که به‌موجب آن، تماس بین ذرات به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد که باعث تقویت پیوند ذرات از طریق نیروهای وندروالی و الکترواستاتیک می‌شود. در مرحله سوم، فشار بیشتر تا نقطه‌ای اعمال می‌شود که زیست‌توده متراکم شده دانسیته‌ای نزدیک به دانسیته اجزای آن به دست آورد. به‌عنوان نتیجه فرآیند، محصولی با میزان حفره‌های بین ذرات حداقل به دست می‌آید که از تغییر مکان ذرات جلوگیری می‌کند و همچنین همگنی ۷۰٪ بین ذرات حاصل می‌شود.

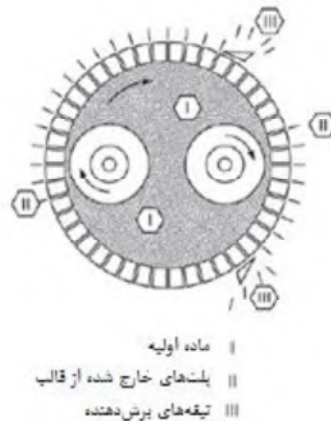
مکانیسم‌های احتمالی پیوند ذرات طی متراکم سازی می‌تواند به دلیل تشکیل پل‌های بین ذره‌ای جامد باشد. فشار بکار رفته روی ذرات، نقطه ذوب ذرات را از طریق هل دادن آن‌ها به سمت هم کاهش می‌دهد در نتیجه ناحیه تماس افزایش می‌یابد و یک نقطه ذوب تعادل جدید به دست می‌یابد. حضور مایعات مثل آب در طول متراکم سازی منجر به نیروهای کشش سطحی و فشارهای کاپیلاری شده که پیوند ذرات را تقویت می‌کند [۷].

### ۴- ملاحظات مهم در مورد ویژگی‌های ذاتی زیست‌توده در فرآیند احتراق

در ارتباط با چگونگی تأثیر ویژگی‌های ماده زیست‌توده بر احتراق دو جنبه مهم وجود دارد. اول، درکی از چگونگی تأثیر ویژگی‌های ذاتی ماده مانند میزان خاکستر<sup>۲</sup> و مواد فرار<sup>۳</sup> بر تخریب گرمایی شیمیایی ماده جامد به گازهای پیرولیزی مورد نیاز است. دوم، درکی از اثرات متغیرهای فرآیندی ضروری است. برخی روش‌های استاندارد آنالیز سوخت جامد، جهت تعیین و مقایسه ویژگی‌های ذاتی ماده زیست‌توده‌ای، شامل آنالیز گروهی<sup>۴</sup> آنالیز نهایی<sup>۵</sup> ارزش

به لحاظ اندازه، شکل (استوانه‌ای) و دانسیته واحد (۱۱۹۰-۱۱۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب) دارد.

یک پلت ساز شامل یک قالب فولادی پرکربن سوراخ‌دار همراه با یک یا دو غلتک است. با چرخش قالب و غلتک‌ها، ماده اولیه با فشار از بین سوراخ‌ها با تشکیل پلت‌های متراکم خارج می‌شود (شکل ۱).



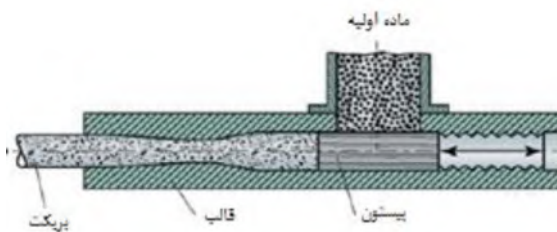
### ۲-۱-۲- بریکت پرس

معمولاً در بریکت سازی از پرس‌های هیدرولیکی، مکانیکی یا غلتکی استفاده می‌شود. برخلاف ماشین‌های پلت، ماشین‌های بریکت‌ساز می‌توانند ذرات با اندازه بزرگ‌تر و مقادیر رطوبتی بیشتر بدون افزودن چسباننده را کنترل کنند. بریکت‌ها مزایایی مانند تغذیه آسان‌تر کوره، یکنواختی بیشتر به لحاظ اندازه و شکل، ارزش گرمایی بیشتر به دلیل کاهش مقدار رطوبت ذاتی، ویژگی‌های احتراق اصلاح‌شده و کاهش نشر غبار و ذرات جامد را ارائه می‌دهند [۷].

به‌علاوه بریکت‌ها می‌توانند در کوره‌های پیکره‌هایی که پلت‌های سوختی استفاده می‌شوند بکار روند.

مهم‌ترین عیب استفاده از بریکت‌ها یا پلت‌های زیست‌توده‌ای در کوره‌های صنعتی، رسوب خاکستر به علت مقدار کمی موجود در سوخت‌های جامد تولیدی است. هرچند همه سوخت‌های زیست‌توده‌ای ویژگی‌های رسوب متفاوتی نسبت به سوخت‌های فسیلی مثل زغال‌سنگ دارند اما این مشکل می‌تواند با ملاحظات مناسب طراحی حل شود [۸].

طرح کلی معمول از پرس مکانیکی یا هیدرولیکی در شکل ۲ نشان داده شده است.



بریکت سازی زیست‌توده، تحت فشار و دمای بالا است. این فرآیند سبب خود چسبی ذرات زیست‌توده و تشکیل بریکت به دلیل جریان ترموپلاستیکی می‌گردد. لیگنین موجود در زیست‌توده به‌عنوان چسباننده، تحت فشارها و

<sup>۱</sup>volatile matter  
<sup>۲</sup>proximate analysis  
<sup>۳</sup>ultimate analysis

<sup>۱</sup>Briquette press  
<sup>۲</sup>binder  
<sup>۳</sup>ash content



رفتار گرمایی سوخت جامد تحت تأثیر میزان مواد فرار است. اما این رفتار مؤثر از ساختار و پیوندیابی درون سوخت نیز می‌باشد، در نتیجه تعیین کیفیت سوخت دشوار است. سوخت‌های با کیفیت پایین از قبیل سوخت‌های حاصل از کود حیوانی تمایل به داشتن مواد فرار کم دارند که منجر به احتراق بدون شعله و با دود می‌شود. این نتایج برای پخت و پز در یک اجاق چوبی هستند که احتمال برخورد گازهای داغ به کف تابه کمتر است و انتقال گرمای تابشی کمتری وجود خواهد داشت (به دلیل عدم شعله) و کارایی انتقال گرمایی کاهش خواهد یافت.

پس از اینکه مواد فرار و رطوبت آزاد شدند، خاکستر و کربن ثابت باقی می‌ماند. معمولاً نسبت نسبی مواد فرار، رطوبت، کربن ثابت و خاکستر برای سوخت‌های زیست‌توده گزارش می‌شود. درصد کربن ثابت معمولاً از تفاضل دیگر مقادیر تعیین می‌شود:

$$\text{(مواد فرار)} + \text{درصد رطوبت} + \text{خاکستر} + \text{کربن ثابت} = 100\%$$

ضرورتاً کربن ثابت یک سوخت، درصد کربن قابل دسترس برای احتراق زغال است که این مقدار با مقدار کل کربن در سوخت (کربن نهایی) برابر نیست زیرا مقدار قابل توجهی به‌عنوان هیدروکربن‌ها در مواد فرار آزاد می‌شود. کربن ثابت به نسبتی از زغال دلالت دارد که بعد از فاز مواد فرار زدایی باقی می‌ماند [۱۲].

#### ۴-۵- مقدار خاکستر

خاکستر بخش غیر قابل احتراق زیست‌توده است و سوخت با میزان خاکستر بیشتر، ارزش گرمایی کمتری دارد. دو نوع خاکستر وجود دارد. خاکستر ذاتی که از پیوند ماده معدنی در ساختار کربنی زیست‌توده طی احتراق آن تشکیل شده است و خاکستر وارد شده که به شکل ذرات گرد و غبار وارد شده به سوخت طی برداشت، حمل‌ونقل و فرآوری وجود دارد. میزان خاکستر با گرما دادن نمونه خشک زیست‌توده در یک بوته چینی در کوره‌ای با دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تعیین می‌شود. بسته به نوع زیست‌توده، مقدار خاکستر از ۰/۸ درصد برای پوست بادام‌زمینی تا مقدار زیاد ۲۳ درصد برای سیوس برنج متغیر است. در مقام مقایسه چوب کاج میزان خاکستری در حدود ۱ درصد دارد.

خاکستر به علت ایجاد مشکلاتی مانند رسوب و سربراه‌آدر سیستم‌های احتراق و تمایل آن به افزایش نرخ خوردگی فلزات در سیستم شناخته شده است. شاخص‌های تجربی متعددی توسعه یافته‌اند که این رفتار نامطلوب را با ارتباط دادن آن به ترکیب سوخت‌ها کمی‌کنند. این شاخص‌ها عمدتاً برای سوخت‌هایی مانند زغال سنگ بوده‌اند و دارای ارزش محدودی برای زیست‌توده هستند. باین‌حال، شاخص قلیایی به‌عنوان یک شاخص ساده محبوب شناخته شده است. این شاخص مقدار اکسید قلیایی سوخت در واحد انرژی را بیان می‌کند. بالاتر از یک آستانه معین، سربراه محتمل‌تر است. به‌عنوان مثال کاه و علف‌ها شاخص‌های قلیایی نسبتاً بالایی دارند که با محتوای خاکستر زیاد این سوخت‌ها سازگار است. اگرچه شاخص قلیایی رفتار رسوب‌گرفتنی مورد انتظار را به‌طور کامل توصیف نمی‌کند اما به‌عنوان یک راهنمای کلی مفید است. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که آبشویی فلزات قلیایی با شستشو یا خیساندن زیست‌توده در آب باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در دمای ذوب خاکستر می‌شود. در واقع این تکنیک ساده حذف بیشتر از ۸۰ درصد قلیا و حداکثر کلر را نشان داده شده است که دارای مزیت بیشتری از کاهش خوردگی و نشر گازهای اسیدی است. همچنین رفتار ذوبی خاکستر در تعیین تمایل برای تشکیل

گرماییو سرعت مواد فرار زدایی هستند. آنالیز گروهی ایده‌ای از اجزای حجمی تشکیل دهنده یک سوخت ارائه می‌دهد که با رفتار احتراقی آن ارتباط نزدیکی دارد. همچنین هدف آنالیز نهایی تعیین اجزای اصلی زیست‌توده به لحاظ ترکیب شیمیایی عنصری آن به‌جای اجزای حجمی است. ارزش گرمایی، اندازه گیری مقدار انرژی سوخت است و سرعت مواد فرار زدایی تعیین می‌کند که با چه سرعتی سوخت می‌سوزد. این ویژگی‌ها برای زیست‌توده بکر غیر متراکم شده تعیین می‌شوند و بسیاری از آن‌ها در دمای محیط هستند و شرح کاملی از چگونگی رفتار زیست‌توده زمانی که به بریکت متراکم می‌شود نمی‌دهند [۱۰].

#### ۴-۱- آنالیز گروهی

آنالیز گروهی یک روش استاندارد آنالیز است که برخی ویژگی‌های فیزیکی زیست‌توده را تعیین می‌کند که بر ویژگی‌های احتراق تأثیر می‌گذارند. این آنالیز این کار را با در نظر گرفتن اینکه زیست‌توده از چهار جز مهم تشکیل شده انجام می‌دهد: مقدار رطوبت، ماده فرار، خاکستر و کربن ثابت. سپس نسبت‌های نسبی این چهار جز با روش‌های متفاوت تعیین می‌گردد.

#### ۴-۲- مقدار رطوبت

مقدار رطوبت، اندازه گیری مقدار آب در سوخت جامد است. در سوخت‌های جامد، دو شکل رطوبت می‌تواند وجود داشته باشد: آب آزاد در خلل و فرج و شکاف‌های سوخت جامد و آب پیوندی که بخشی از ساختار شیمیایی ماده است. میزان رطوبت ویژگی مهمی است و اثر زیادی بر ویژگی‌های سوختن زیست‌توده دارد. میزان رطوبت، هم بر پیشینه دمای داخل ماده جامد، به دلیل تبخیر گرماگیر و هم بر انرژی کل مورد نیاز - که ماده جامد را به دمای پیرولیز نزدیک کند - تأثیرگذار است. در طول احتراق، رطوبت موجود در زیست‌توده گرما را با تبخیر شدن و گرم کردن بخار حاصله جذب خواهد کرد و به‌طور عمده‌ای ارزش گرمایی سوخت کاهش می‌یابد. نتیجه این است که گرمای کمتری برای پیشبرد واکنش‌های پیرولیز در دسترس است که منجر به دماهای احتراق پایین‌تر و احتراق ناکامل مواد فرار و رسوب کربن نسوخته (دود) به‌عنوان مثال در محفظه احتراق اجاق و ته تابه‌های پخت و پز می‌گردد. میزان رطوبت زیاد نیز می‌تواند منجر به دشواری در آتش‌گیری شود. در عمل، سوزاندن سوخت با مقدار رطوبت زیاد منجر به فرآورده‌ها فرآورده‌های ناکامل احتراق قابل توجهی خواهد شد و سوخت تکمیلی اضافی نیز مورد نیاز خواهد بود [۱۱].

#### ۴-۳- مواد فرار و کربن ثابت<sup>۱</sup>

مواد فرار اجزای کربن، هیدروژن و اکسیژن موجود در زیست‌توده را نشان می‌دهد که وقتی گرم می‌شوند به بخار تبدیل می‌گردند که معمولاً مخلوطی از هیدروکربن‌های کوتاه و بلند زنجیر هستند. گرما دادن نمونه زیست‌توده در یک آون در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ دقیقه مقدار مواد فرار را تعیین می‌کند که می‌تواند به‌عنوان درصدی از افت وزن نمونه حساب شود.

میزان مواد فرار تقریباً در همه مواد زیست‌توده‌ای، بیشتر از زغال بیتومینس است. معمولاً میزان ماده فرار زیست‌توده ۷۰-۸۶ درصد بر مبنای وزن خشک زیست‌توده است در حالی که زغال که تنها حدود ۳۵ درصد ماده فرار است. نتیجتاً توزیع کسری گرمای مواد فرار برای زیست‌توده بیشتر است که باعث می‌شود زیست‌توده سوخت واکنش‌پذیرتری نسبت به زغال باشد و سرعت احتراق بیشتری طی فاز مواد فرار زدایی ارائه دهد.

slagging  
'fouling

Fixed carbon  
'bituminous



ارزش کالری با میزان رطوبت سوخت محدود می‌شود، زیرا گرما برای تبخیر آب استفاده می‌شود و گرمای کمتری آزاد می‌شود. علاوه بر این، ارزش گرمایی توسط غلظت خاکستر در یک سوخت نیز محدود می‌شود؛ تقریباً هر ۱٪ اضافی خاکستر به مقدار  $0.2 \text{ MJ/kg}$  ارزش گرمایی را کاهش می‌دهد [۱۵].

#### ۵- متغیرهای سیستم متراکم کردن

کنترل متغیرهای سیستم پلت سازی و بریکت سازی، شامل متغیرهای فرآیندی و ماده اولیه نقش مهمی را در به دست آوردن دانسیته مطلوب، دوام و کیفیت بازی می‌کند. شایع‌ترین متغیرهای فرآیندی (دمای قالب، فشار و ژئومتری) و متغیرهای ماده اولیه (مقدار رطوبت، شکل و اندازه ذرات) و ترکیب ماده اولیه (پروتئین، سلولز، همی سلولزها و لیگنین) نقش مهمی در کیفیت سوخت جامد زیستی تولید شده بازی می‌کند.

#### ۵-۱- متغیرهای فرآیندی

##### ۱-۱-۵- دما

ویژگی‌های کیفیتی مثل دوام و دانسیته حجمی زیست‌توده متراکم شده، به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر دما هستند. اسمیت و همکاران<sup>۱</sup> در مطالعاتشان در مورد بریکت سازی کاه گندم دریافتند که زمانی که دما از ۶۰ به ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد زیاد می‌شود، میزان فشردگی و پایداری ابعادی افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند که انبساط بریکت زمانی که دمای قالب بین ۹۰ و ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد است کاهش می‌یابد. کالین و موری<sup>۲</sup> دمای گذار شیشه‌ای لیگنین را برای درک رفتار متراکم سازی به کار بردند. مطالعات آن‌ها شامل سه دمای متفاوت است: دو دما در داخل محدوده دمای گذار شیشه‌ای (۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) و یکی بیرون از آن. مقادیر دوام زیست‌توده متراکم شده بیرون از دمای گذار شیشه‌ای در مقایسه با آن‌هایی که در داخل محدوده بودند کمتر بود.

##### ۱-۲-۵- فشار

فشار نقش مهمی را در کیفیت بریکت‌ها و پلت‌های سوختی تولید شده از زیست‌توده بازی می‌کند. یامان و همکاران<sup>۳</sup> در مطالعات خود در مورد بریکت‌های سوختی ساخته شده از تفاله زیتون و پسماند کارخانه کاغذ پیشنهاد کردند که فشار بهینه بریکت سازی وجود دارد که بالاتر از آن ممکن است به دلیل آماس منجر به شکست‌هایی در بریکت شود. دماها و فشارهای بالا طی متراکم کردن باعث توسعه پل‌های جامد از طریق نفوذ مولکول‌ها از یک ذره به ذره دیگر در نقاط تماس می‌شود که دانسیته را افزایش می‌دهد. لی و لئو<sup>۴</sup> مشاهده کردند که فشردن خاکاره بلوط با سرعت‌های اعمال فشار ۰.۲۴ تا ۵ مگاپاسکال بر ثانیه، اثر قابل‌ملاحظه‌ای روی دانسیته خشک فرآورده دارد. برای فشردن مواد ضایعاتی زیست‌توده‌ای مثل کاغذ باطله، دمیرباس و همکاران مشاهده کردند که با افزایش فشار از ۳۰۰ به ۸۰۰ مگاپاسکال روی زیست‌توده‌ای با رطوبت ۷ درصد، ابتدا دانسیته به شدت افزایش یافت و سپس به میزان اندکی افزایش یافت.

#### ۳-۱-۵- زمان نگهداشت و زمان رهایش

کیفیت بریکت‌ها تحت تأثیر زمان‌های ماند یا نگهداشت مواد در قالب است. لی و لئو دریافتند که زمان نگهداشت برای خاکاره بلوط اثر بیشتری در فشارهای کمتر در مقایسه با فشارهای بیشتر دارد. در بالاترین فشار (۱۳۸ مگاپاسکال) اثر زمان نگهداشت قابل چشم‌پوشی بود. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که زمان نگهداشت اثر اندکی روی نرخ انبساط دارد. زمان نگهداشت ۱۰

رسوبات مهم است که این پدیده می‌تواند در دمای حدود ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ دهد. علاوه بر این، خاکستر می‌تواند در انتقال حرارت به سطح سوخت و انتشار اکسیژن به سطح سوخت در طی احتراق تأثیر قابل‌توجهی داشته باشد [۱۳].

#### ۶-۴- آنالیز نهایی

آنالیز نهایی شامل برآورد عناصر شیمیایی مهم مانند کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن و گوگرد است که زیست‌توده را تشکیل می‌دهند. روش اصلی برای انجام آنالیز نهایی سوزاندن نمونه زیست‌توده در یک بوته پلاتینی در جریان هوا برای تولید دی‌اکسید کربن و آب است. اجزاء جرمی و درصد کربن و هیدروژن محاسبه و توسط روش‌های تجزیه و تحلیل گازی تعیین می‌شوند. اگر مقادیر خاکستر و رطوبت مشخص هستند، مقدار اکسیژن می‌تواند با تفاضل تعیین گردد.

آنالیز زیست‌توده با استفاده از این روش آشکار می‌کند که اجزاء اصلی مثل کربن ۳۰ تا ۶۰ درصد، ۳۰ تا ۴۰ درصد اکسیژن، هیدروژن ۶-۵ درصد و نیتروژن و سولفور و کلر معمولاً کمتر از یک درصد ماده خشک را تشکیل می‌دهند. در مقایسه با سوخت‌های دیگر از قبیل زغال‌سنگ یا زغال‌سنگ نارس، زیست‌توده شامل مقادیر نسبتاً بالای اکسیژن و هیدروژن است.

ترکیب حاصل از زیست‌توده بر ویژگی‌های احتراق آن تأثیر می‌گذارد. روند کاهش جرم کل در سوخت جامد در طول فاز احتراق مواد فرار به‌عنوان نسبت افزایش یافته هیدروژن به کربن سوخت، افزایش می‌یابد؛ اگر چه به میزان کمتری نسبت اکسیژن به کربن افزایش می‌یابد. میزان زیاد مواد فرار زیست‌توده به معنای آن است که می‌تواند بیش از ۷۹٪ از جرمش را در مرحله مواد فرار زدایی احتراق از دست بدهد، در مقایسه با زغال‌سنگ‌هایی که از طریق این فرآیند بین ۵ تا ۶۵ درصد جرمشان از دست می‌دهند [۱۴].

#### ۷-۴- ارزش گرمایی

ارزش کالری (یا ارزش گرمایی) اندازه‌گیری استاندارد میزان انرژی سوخت است. ارزش گرمایی مقدار گرمای آزاد شده است هنگامی که یک وزن واحد سوخت به‌طور کامل سوزانده و محصولات احتراق تا ۲۹۸ کلوین خنک شوند. وقتی که گرمای نهان تراکم آب در ارزش کالری گنجانده شود ارزش کالری ناخالص<sup>۱</sup> (GCV) یا ارزش گرمایی بالاتر می‌گویند. تفاضل گرمای تراکم آب از ارزش کالری به‌عنوان ارزش گرمایی خالص<sup>۲</sup> (NCV) یا ارزش گرمایی کمتر شناخته می‌شود.

ارزش گرمایی یک سوخت ویژه به میزان اکسیژن مورد نیاز جهت احتراق کامل سوخت مربوط می‌شود. برای هر گرم اکسیژن سوخته شده، ۱۴۰۲۲ ژول انرژی آزاد می‌شود. در نتیجه، سوخت‌های حاوی کربن با درجه اکسیداسیون بالاتر، ارزش گرمایی کمتری خواهند داشت زیرا اکسیژن کمتری برای اکسیداسیون کامل آن‌ها لازم است. در مقابل، در سوخت شامل ترکیبات هیدروکربنی که درجه اکسیداسیون پایین‌تری دارند، ارزش گرمایی سوخت زیست‌توده‌ای افزایش می‌یابد. به همین دلیل است که در سوخت‌های زیست‌توده‌ای که کربن آن به شکل تقریباً اکسید شده وجود دارد، ارزش گرمایی کمتر از زغال‌سنگ است. تلاش‌های مختلفی در ارتباط دادن ارزش گرمایی به ترکیب مواد انجام شده و نتایج، محاسبه ارزش گرمایی بالاتر زیست‌توده از ترکیب عناصر را نشان داده است.



<sup>۱</sup>Kaliyan and Morey  
<sup>۲</sup>Yaman et al  
<sup>۳</sup>Ti and Liu

<sup>۱</sup>gross calorific value  
<sup>۲</sup>net calorific value  
<sup>۳</sup>Smith et al

جدول ۱ توزیع بهینه ذرات جهت تولید پلت	
ماده اولیه باقیمانده	اندازه غربال (mm)
روی غربال	۳
$\leq 1\%$	۲
$\leq 5\%$	۱
$\approx 20\%$	۰/۵
$\approx 30\%$	۰/۲۵
$\approx 24\%$	۰/۱۲۵
$\geq 20\%$	< ۰/۱۲۵

#### ۶- ویژگی‌های سوخت جامد زیستی تولید شده

##### ۶-۱- میزان رطوبت

مقدار بهینه رطوبت در زیست‌توده متراکم شده خیلی مهم است و عمدتاً به شرایط فرآیندی مانند میزان رطوبت اولیه، دما و فشار بستگی دارد. زمانی که میزان رطوبت اولیه بیشتر از ۱۵٪ باشد میزان رطوبت بیشتر در فرآورده‌های نهایی حاصل می‌شود. مانی و همکاران<sup>۱</sup> مشاهده کردند که میزان رطوبت اولیه بیشتر از ۱۵٪ و فشار بیشتر از ۱۵ مگاپاسکال روی کیفیت بریکت حاصل در مکان‌هایی از بریکت که ترک اتفاق می‌افتد اثر منفی دارند. رطوبت کم (کمتر از ۵٪) می‌تواند منجر به افت بازده شود. چون پلت های تولید شده تمایل به شکست، تولید نرمة‌های بیشتر در طول ذخیره سازی و حمل‌ونقل دارند. رطوبت زیاد در پلت ها سبب تخریب آن به علت تجزیه میکروبی می‌شود که نتیجه آن افت معنی دار ماده خشک طی ذخیره سازی و حمل‌ونقل است.

##### ۶-۲- دانسیته واحد و حجمی

دانسیته واحد و حجمی عمدتاً تحت تأثیر رطوبت ماده اولیه و اندازه ذرات، فشار و دمای فرآیند هستند. به‌طور کلی هر چه رطوبت بیشتر و اندازه ذرات بزرگ‌تر باشد دانسیته واحد و حجمی کمتر است در حالی که دماها و فشارهای فرآیندی بیشتر، دانسیته واحد و حجمی را افزایش می‌دهند. رن و همکاران<sup>۲</sup> دریافتند که دانسیته خشک زیاد متناظر با مقاومت فشاری زیاد است. تومولورا و همکاران<sup>۳</sup> در تحقیقی در مورد پلت کردن DDGS نشان دادند که دانسیته واحد و حجمی به رطوبت ماده و دمای قالب بستگی دارد، بیشینه دانسیته واحد  $1200 \text{ kg/m}^3$  و دانسیته حجمی  $700 \text{ kg/m}^3$  در دماهای حدود ۱۰۰ درجه سانتی گراد و رطوبت تغذیه حدود ۷-۵ دست یافتنی است.

##### ۶-۳- شاخص دوام (%)

شاخص دوام پارامتری کیفی است که توانایی مواد متراکم شده به سالم ماندن در طول ذخیره سازی و حمل‌ونقل و جابجایی را مشخص می‌کند. اندازه گیری‌های دوام یا مقاومت به سایش به شبیه سازی نیروهای جابجایی مکانیکی یا پنوماتیکی در کنترل کیفیت تغذیه مواد اولیه کمک می‌کند. وقتی که ترکیبات محلول در آب از قبیل شکر، نشاسته، سودا اش، فسفات سدیم، نمک پتاسیم و کلرید کلسیم در ماده اولیه حضور داشته باشند، رطوبت دوام را افزایش می‌دهد. نشاسته به‌عنوان یک چسباننده عمل می‌کند و دوام را افزایش می‌دهد. نشاسته طبیعی ظرفیت اتصال دهندگی کمتری از نشاسته

ثانیه منجر به افزایش ۵ درصدی در لگاریتم دانسیته می‌شود در حالی که در زمان نگهداشت طولانی‌تر از ۲۰ ثانیه، این اثر به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. آل وایدیان و همکاران<sup>۴</sup> دریافتند که زمان‌های ماند بین ۵ و ۲۰ ثانیه اثر معنی داری روی دوام و پایداری بریکت تفاله زیتون ندارند.

به‌طور کلی زمان رهش<sup>۵</sup> دانسیته مواد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دانسیته رهاسازی بریکت سوختی و رفتار رهش به دنبال جدا کردن بریکت از قالب، به عوامل زیادی مثل ژئومتری قالب، مقدار و روش فشردن، نوع و ویژگی‌های ماده زیست‌توده و شرایط ذخیره سازی بستگی دارد. مطالعات زیادی روی متراکم کردن زیست‌توده با فشار بالا نشان دادند که به محض جدا کردن مواد از قالب، با گذشت زمان دانسیته فرآورده تا رسیدن به یک دانسیته رهاسازی نهایی کاهش می‌یابد. برای اکثر مواد اولیه، نرخ انبساط درست بعد از حذف فشار، بیشینه است و با گذشت زمان نرخ انبساط کاهش می‌یابد تا ذرات حجم ثابتی به دست آورند [۷].

#### ۲-۵- متغیرهای ماده اولیه

متغیرهای ماده اولیه شامل مقدار رطوبت و اندازه، شکل و توزیع ذرات است.

##### مقدار رطوبت

میزان رطوبت نقش مهمی در تشکیل سوخت جامد بازی می‌کند. در فرآیند تولید سوخت جامد زیستی، آب به صورت یک فیلم اتصال دهنده عمل می‌کند و باعث تقویت و افزایش پیوندیابی ذرات از طریق نیروهای ون وردالسی می‌شود و در نتیجه سطح تماس ذرات زیاد می‌شود.

رطوبت زیست‌توده، ژلاتینه شدن نشاسته، باز شدن پروتئین<sup>۶</sup> و فرآیندهای حل شدن فیبر در طول متراکم سازی را تسهیل می‌کند. اثر مقدار رطوبت می‌تواند از سه جهت باشد:

(۱) دمای گذار شیشه‌ای آلیگین را پایین می‌آورد

(۲) تشکیل پل جامد را افزایش می‌دهد

(۳) نواحی تماس ذرات توسط نیروهای واندروالسی افزایش می‌یابد.

مقدار رطوبت بهینه بین ۵-۱۰ درصد گزارش شده است.

#### ۳-۵- اندازه، شکل و توزیع ذرات

در مورد بریکت ها، اندازه‌های بزرگ‌تر از ۶ میلی‌متر برای ذرات مطلوب هستند که باعث بلوکه شدن بهتر ذرات و افزایش دوام می‌شوند. سانگ و همکاران<sup>۸</sup> در مورد کاربرد کاه و کلزا نشان دادند که اندازه ذرات ۲-۳ سانتی متر منجر به بریکت‌های با کیفیت خوب با استفاده از یک پرس پیستون هیدرولیکی می‌شود. همچنین آن‌ها دریافتند که اندازه‌های بزرگ‌تر ذرات طی بریکت سازی به درهم‌رفتنی ذرات کمک می‌کند و بریکت با دوام بیشتر تولید می‌شود.

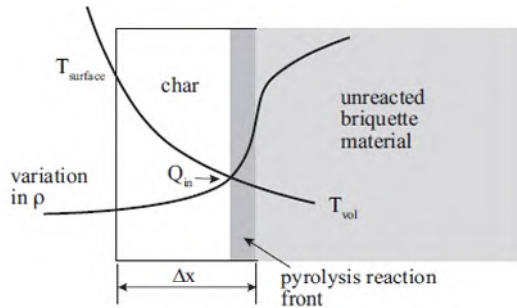
به‌طور کلی دانسیته و دوام پلت ها به‌طور معکوس با اندازه ذرات متناسب است زیرا ذرات ریزتر ناحیه تماس بزرگتری در طول متراکم سازی دارند. افزودن درصد مشخصی نرمة به ذرات با اندازه متوسط کارایی پلت سازی را بهبود بخشیده و هزینه‌های پلت سازی را کاهش می‌دهد. ذرات خیلی کوچک می‌توانند منجر به مسدود شدن ماشین‌های پلت شوند و ظرفیت تولید را تحت تأثیر قرار دهند. جدول ۱ توزیع اندازه ذرات را برای تولید پلت‌های با کیفیت نشان می‌دهد [۷].

<sup>۱</sup>Mani et al  
<sup>۲</sup>Rhen et al  
<sup>۳</sup>Tumuluru et al  
<sup>۴</sup>dried distillers with soluble  
Durability index

Wl-Widyan et al.  
<sup>۵</sup>relaxation time  
<sup>۶</sup>protein unfolding  
<sup>۷</sup>glass transition temperature  
<sup>۸</sup>Song et al.  
<sup>۹</sup>interlocking



می‌ماند، با اکسیژن واکنش می‌دهد و گرما آزاد می‌شود. طی فاز مواد فرار زدایی، خروج مواد فرار از سطح سوخت مانع از رسیدن اکسیژن به سطح زغال می‌شود.



شکل ۳ تصویری از تغییرات دما و دانسیته جامد پیرولیز شده

معمولاً جریان خروجی از سطح جامد از احتراق سریع زغال جلوگیری می‌کند و تا زمانی که تقریباً کل سوخت پیرولیز شود کافی است. همچنین جریان خروجی اجازه می‌دهد که فرآیندهای مواد فرار زدایی و احتراق زغال به‌طور جداگانه‌ای مدل سازی شوند. به‌رحال در مواردی مثل احتراق گرده بینه‌های بزرگ هر سه فرآیند تبخیر رطوبت، مواد فرار زدایی و احتراق زغال به‌طور همزمان اتفاق می‌افتند [۱۶].

#### ۸- نتیجه

اثرات زیست محیطی کمتر و کاهش در پتانسیل گرمایش جهانی سوخت جامد زیستی مثل بریکت و پلت قابل توجه است. متراکم کردن ماده زیست‌توده‌ای روشی برای تولید پلت‌ها و بریکت‌های سوختی است. کیفیت ماده متراکم شده و انرژی لازم برای متراکم کردن آن‌ها کاملاً توسط فرآیند فشرده‌سازی، ویژگی‌های فیزیکی و ترکیب شیمیایی زیست‌توده تحت تأثیر قرار می‌گیرند. ویژگی‌های کیفی مهم سوخت جامد زیستی مثل بریکت‌ها و پلت‌های سوختی شامل شاخص دوام، دانسیته حجمی، میزان رطوبت، درصد نرمة و ارزش کالری است که با استفاده از استانداردهای بین‌المللی موجود توسعه یافته توسط PFI در ایالات متحده آمریکا و CEN در اروپا ارزیابی شده است. استانداردهای مختلفی برای تعیین ویژگی‌های مؤثر بر رفتار احتراق زیست‌توده وجود دارند. میزان مواد فرار سوخت جامد، واکنش پذیری آن را نشان می‌دهد و آیا بخش بزرگی از گرما با احتراق شعله یا احتراق زغال آزاد می‌شود. آگاهی از میزان گرما دلالتی بر مقدار انرژی قابل دسترس است که از سوخت جامد آزاد می‌شود. همچنین دانستن مقدار رطوبت دلالت بر مقدار گرمایی است که از ارزش گرمایی مؤثر می‌کاهد. این خواص تنها منحصر به زیست‌توده هستند.

اگرچه اطلاعات زیادی در مورد سوخت‌های مایع زیستی در دسترس است، لیکن در بخش سوخت‌های جامد زیستی اطلاعات کمی در بخش پالایشگاه زیستی می‌توان یافت و علی‌رغم وجود آرایه‌ای از تکنولوژی‌های تبدیلی زیست‌توده خام به سوخت با ارزش، اغلب این سوخت‌های جامد، مقادیر ارزش حرارتی ناکافی در مقایسه با زغال‌سنگ یا کک زغال‌سنگ دارند. بنابراین چنین سوخت‌های جامد معمولاً عملکرد ضعیفی نسبت به زغال در شرایط احتراق شدید دارند. در نتیجه برای چنین سوخت‌های جامد زیست‌توده‌ای، رقابت با زغال سخت است حتی وقتی که هزینه‌های چرخه عمر زغال‌سنگ برای تولید الکتریسیته در نظر گرفته می‌شود. بنابراین از مشکلات کلیدی استفاده از

ژلاتینه شده دارد. رطوبت و گرما فرآیند ژلاتینه شدن را تسریع می‌کند. پروتئین نیز در اثر گرما و رطوبت مانند پلاستیک نرم می‌شود و به‌عنوان چسباندن عمل می‌کند. چربی به‌عنوان روان‌کننده بین ذرات ماده اولیه و دیواره قالب عمل می‌کند و میزان زیاد آن از دوام فرآورده می‌کاهد.

لیگنین در دمای بالای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان چسباندن عمل می‌کند و دوام را افزایش می‌دهد. پیش‌گرماده‌ی یا شرایط بخار، فعالیت ذاتی بایندهایی مانند لیگنین و نشاسته را افزایش می‌دهد و فرآورده بادوام‌تری تولید می‌شود. همچنین پیش‌گرماده‌ی یا افزایش ژلاتینه شدن نشاسته و تغییر ماهیت پروتئین دوام را زیاد می‌کند. نهایتاً اندازه ذرات و متغیرهای فرایندی مثل ابعاد قالب، نسبت  $L/D$  و سرعت‌های چرخش نیز روی مقادیر دوام تأثیر می‌گذارند.

#### ۴-۶ ارزش گرمایی (MJ/kg)

به‌طور کلی ارزش گرمایی بریکت‌ها و پلت‌ها به ارزش گرمایی ذاتی ماده اولیه و شرایط فرایندی مثل دما، اندازه ذرات و پیش‌تیمار مواد اولیه بستگی دارد. معمولاً پلت‌های با دانسیته بالاتر، ارزش گرمایی بیشتری دارند. ارزش گرمایی معمول پلت‌های چوبی و بر پایه کاه در حدود ۱۷-۱۸ MJ/kg است. محققان زیادی مشاهده کرده‌اند که فرآیندهای پیش‌تیمار انفجار بخار یا خشک کردن<sup>۱</sup> پیش از متراکم کردن ارزش گرمایی را تا ۲۰-۲۲ MJ/kg افزایش می‌دهند [۱۷].

#### ۷- مروری بر احتراق سوخت جامد

سوزاندن زیست‌توده فرایندی پیچیده است که شامل هر دو پدیده فاز گازی و فاز جامد است و به طیف وسیعی از عوامل و فرآیندها وابسته است. تلاش‌های زیادی برای توسعه مدل‌های ساده جهت درک این فرآیندها و درک مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر آن انجام شده است. به‌طور کلی، مدل‌ها فرض می‌کنند که در هنگام احتراق، سوخت جامد سه مرحله اتلاف جرمی را متحمل می‌شود: خشک شدن، مواد فرار زدایی و احتراق زغال. احتراق شعله ور مواد فرار در سطح جامد، تجزیه حرارتی بیشتری را موجب می‌شود. تقسیم تجزیه حرارتی به مراحل کلیدی، مفید است چرا که فرآیندهای کلیدی که در طول احتراق سوخت جامد رخ می‌دهد را شناسایی می‌کند. اهمیت نسبی هر یک از این فرآیندها وابسته به خواص سوخت جامد و محیطی است که آن را می‌سوزاند. هنگامی که گرادیان‌های دمایی گرم شده در سوخت جامد تنظیم می‌شوند موجب هم‌پیشبرد و هم محدود شدن تجزیه حرارتی می‌شوند. گرما به داخل بریکت نفوذ می‌کند، رطوبت تبخیر می‌شود و هنگامی که سطح به اندازه کافی گرم شد یک فرآیند تجزیه حرارتی زیست‌توده رخ می‌دهد که پیرولیز<sup>۲</sup> یا مواد فرار زدایی می‌نامند. پیرولیز با گرادیان دمایی درون بریکت پیش‌روی می‌کند. حجم کوچکی از جامد که در معرض پیرولیز قرار دارد در هر لحظه از زمان به‌عنوان منطقه واکنش پیرولیز شناخته می‌شود. شکل ۳ این را نشان می‌دهد. در این فرآیند، مواد فرار گازی آزاد می‌شوند و از جریان بریکت خارج می‌گردند. این مواد فرار دستخوش واکنش‌های ثانویه در حال پیشرفت می‌شوند و جسم زغال<sup>۳</sup> یک ماتریس متخلخل غنی از کربن باقی می‌ماند. روی ماتریکس جامد باقی مانده، مواد فرار گرم می‌شوند و با اکسیژن مخلوط شده و آتش می‌گیرند. این واکنش احتراقی فاز گازی گرماده<sup>۴</sup> منجر به شعله می‌شود که گرما را به سطح جامد تغذیه می‌کند. همانطور که سطح بریکت در پاسخ به شار تحمیلی گرمای حاصل از واکنش فاز گازی، داغ‌تر می‌شود، موج پیرولیز عمیق‌تر و عمیق‌تر به جامد دست نخورده نفوذ می‌کند و موجب مواد فرار زدایی بیشتر می‌شود. لایه زغال که پشت ناحیه در حال تخریب و تحت احتراق ناهمگن باقی

<sup>۱</sup>char  
<sup>۲</sup>exothermic

<sup>۳</sup>torrefaction  
<sup>۴</sup>pyrolysis



سوخت‌های جامد زیستی برای گرما و الکتریسیته می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- دانسیته انرژی نسبتاً کم در مقایسه با سوخت‌های متداول
  - رطوبت را به آسانی در زمان ذخیره‌سازی می‌توانند جذب کنند که کاهش محتوای انرژی را به دنبال دارد.
  - مقادیر خاکستر زیاد
  - تشکیل سرباره در زمان سوختن
  - هزینه‌های زیاد جابجایی.
- بنابراین ضروری به نظر می‌رسد که پژوهش‌های بیشتری در ایران در راستای حل این مشکلات انجام شود تا از پتانسیل زیست‌توده در این نوع سوخت‌های جامد زیستی به دلیل مزایای قابل ملاحظه بهره‌مند گردید.

#### ۹- فهرست منابع:

- [1] <http://www.energyenergy.ir>. 1394.
- [2] Lela, B., M. Barišić, and S. Nižetić, *Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical-mechanical and thermal characteristics*. *Waste Management*, 2016. **47**: p ۲۴۵-۲۴۶.
- [3] *Renewables Global Status Report*. 2017, REN21.
- [4] Wang, Y., Wu, K, and Sun, Y. *Effects of raw material particle size on the briquetting process of rice straw*. 2016. *Journal of the Energy Institute*, 1-10.
- [5] <http://www.satba.gov.ir/>.
- [6] <http://pep.moe.gov.ir>. 1392
- [7] Tumuluru, J.S., et al., *A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application*. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2011. **5**(6): p. 683-707.
- [8] Fournel S, Palacios JH, Godbout S, Heitz M. *Effect of Additives and Fuel Blending on Emissions and Ash-Related Problems from Small-Scale Combustion of Reed Canary Grass*. *Agriculture*. 2015;5(3):561-76
- [9] Tabil LG and Sokhansanj S, *Compression and compaction behavior of alfalfa grinds, Part 2: Compaction behavior*. *Powder Handling Process* 8(2):117-122 (1 996).
- [10] British Standards Institution, "Solid biofuels- terminology, definitions and descriptions." draft biomass standard, DD CEN/TS 14588, 2004.
- [11] B. S. Institution, "Solid biofuels-methods for the determination of moisture content-oven dry method." draft biomass standard, DD CEN/TS 14774-2, ۲۰۰۴.
- [12] B. S. Institution, "Solid biofuels: method for the determination of the content of volatile matter." draft biomass standard, CEN/TS 15148, 2009.
- [13] H. Burnham-Slipper, *Breeding a better stove: The use of Computational Fluid Dynamics and Genetic Algorithms to optimise a wood burning stove for Eritrea*. PhD thesis, University of Nottingham, School of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering, 2008.
- [14] B. S. Institution, "Solid biofuels-determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen- instrumental methods." draft biomass standard, DD CEN/TS 15104, 2005.
- [15] British Standards Institution, "Solid biofuels- method for the determination of calorific value." draft biomass standard, DD CEN/TS 14918, 2005.
- [16] J, Chaney, *Combustion characteristics of biomass briquettes*, PhD thesis, University of Nottingham, ۲۰۱۰.

'clinker

