نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

J. Energy Conversion
Volume: 12, Issue:3, 2025: 73-95

دوره ۱۲، شماره ۳، پاییز۱۴۰۴، ص: ۷۳-۹۵

بررسی رویکردهای بازیابی انرژی از باگاس نیشکر

پریزاد شیخی

استادیار، دانشکده مهندسی ساخت و فناوری‌های صنعتی،واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران. Parizad.sheikhi@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۵/۲۰، بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۱۵

چکیده

با توجه به افزایش تقاضای جهانی برای انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی، استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند زیست‌توده اهمیت زیادی پیدا کرده است. باگاس نیشکر، به‌عنوان یک پسماند کشاورزی، منبعی ارزشمند برای تولید انرژی پایدار است. لذا در این مقاله مروری به بررسی رویکردهای اصلی بازیابی انرژی از باگاس می‌پردازد. روش‌های ترموشیمیایی شامل پیرولیز، گازی‌سازی، احتراق مستقیم و مایع‌سازی هیدروترمال مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. هم‌چنین، فرآیندهای بیوشیمیایی مانند تخمیر برای تولید بیواتانول و روش فیزیکی-ترموشیمیایی بریکت‌سازی بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که هر روش مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارد. مایع‌سازی هیدروترمال باگاس را به روغن زیستی با کیفیت تبدیل می‌کند و بریکت‌سازی نیز چگالی و ارزش حرارتی آن را افزایش می‌دهد. احتراق مستقیم رایج‌ترین روش است اما با چالش‌هایی مانند رطوبت بالا مواجه است که می‌توان با استفاده از احتراق هم‌زمان آن را کاهش داد. هم‌چنین، گازی‌سازی و تخمیر برای تولید سوخت‌های گازی و مایع کارآمد هستند. این بررسی تأکید می‌کند که باگاس نیشکر پتانسیل بالایی برای بازیابی انرژی دارد و انتخاب فرآیند بهینه می‌تواند به کاهش اتکا به سوخت‌های فسیلی و مدیریت بهتر پسماندها کمک شایانی کند.

* **عهده‌دار مکاتبات:** Parizad.sheikhi@iau.ac.ir

کلمات کلیدی: باگاس نیشکر، انرژی زیست‌توده، بازیابی انرژی، پیرولیز، مایع‌سازی حرارتی

نحوه استناد به این مقاله پریزاد شیخی. بررسی رویکردهای بازیابی انرژی از باگاس نیشکر. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۳; ۱۱ (۴) : ۷۳-۹۵.**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

۱- مقدمه

امروزه، مصرف گسترده سوخت‌های فسیلی در تولید انرژی، به‌عنوان عامل اصلی افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای[1] به‌ویژه دی‌اکسیدکربن (CO_2) شناخته می‌شود که به‌طور مستقیم با پدیده گرمایش جهانی مرتبط است[۱ و ۲]. این مسئله، همراه با کمبود منابع فسیلی و نیاز روزافزون به انرژی، جامعه بین‌المللی را به سمت توسعه منابع جایگزین سوق داده است[۳]. کاهش انتشار گازهای آلاینده و در عین‌حال، پاسخ‌گویی به تقاضای فزاینده جهانی برای انرژی، به دو چالش استراتژیک در سیستم‌های تولید انرژی تبدیل شده است[۴]. در این میان، انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان راهکاری پایدار و مؤثر، مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. طبق برنامه‌ریزی‌های سازمان جهانی انرژی، پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۷۰ میلادی حدود ۶۰ درصد از کل مصرف انرژی جهان توسط سوخت‌های تجدیدپذیر تأمین خواهد شد[۵]. در میان گزینه‌های مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر، زیست‌توده[2] به‌دلیل ویژگی‌هایی مانند دسترس‌پذیری بالا، ظرفیت انرژی‌زایی، قابلیت تولید سوخت، مواد شیمیایی اولیه و مزایای زیست‌محیطی، جایگاه ویژه‌ای در تحقیقات علمی و صنعتی یافته است[۶-۸]. این منبع تجدیدپذیر، پس از زغال‌سنگ، گاز طبیعی و نفت، چهارمین منبع عمده تأمین انرژی در سطح جهانی محسوب می‌شود[۹]. زیست‌توده نه‌تنها می‌تواند به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک کند، بلکه به‌دلیل طبیعت کربن‌خنثی و محتوای پایین نیتروژن و گوگرد، از مزیت‌های قابل توجهی از نظر زیست‌محیطی برخوردار است[۱۰]. در حال حاضر، تنها ماده تجدیدپذیری است که می‌تواند سوخت‌های مایع را به‌عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی تولید کند. این ویژگی‌ها زیست‌توده را به یکی از امیدوارکننده‌ترین گزینه‌ها برای تأمین انرژی پایدار در دهه‌های آینده تبدیل کرده است[۷،۱۱] طبق گزارش‌ها، زیست‌توده با تأمین بیش از ۱۲ درصد از کل مصرف نهایی انرژی جهان در سال ۲۰۲۱، هم‌چنان بزرگ‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر است[۱۲]. ضایعات کشاورزی[3] به‌عنوان مواد اولیه زیست‌توده، پتانسیل بالایی برای تولید انرژی زیستی[4] دارند[۱۳]. در ایران، با ۱۸ میلیون هکتار زمین باغی و زراعی، سالانه حدود ۷۰ میلیون تن محصول تولید می‌شود که حدود ۸۰٪ از آن‌ها بقایای گیاهی هستند و با مدیریت صحیح می‌توانند به‌عنوان منبع انرژی مورداستفاده قرار گیرند[۱۴]. یکی از مهم‌ترین این ضایعات، باگاس نیشکر[5] است که محصول جانبی صنایع شکر و اتانول می‌باشد. این ماده که سالانه در مقیاس میلیون‌تنی تولید می‌شود، علاوه بر دسترسی آسان و هزینه پایین، دارای ارزش حرارتی مناسب (حدود ۱۶–۱۲ MJ/kg) و ترکیب شیمیایی مطلوبی از سلولز، همی‌سلولز و لیگنین است که آن را به ماده اولیه‌ای ایده‌آل برای فرآیندهای تبدیل انرژی تبدیل می‌کند[۱۵]. در سال ۱۴۰۲، بیش از ۶ میلیون و ۴۴۵ هزار تن نیشکر در استان خوزستان برداشت شده که این منطقه را به کانون اصلی تولید باگاس در کشور تبدیل کرده است[۱۶]. با این شرایط بررسی امکان استفاده از این منبع تجدیدپذیر در حوزه‌ی انرژی از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود. امکان تبدیل زیست‌توده به سوخت‌های مفید چه به‌صورت مستقیم و چه غیرمستقیم از طریق فرآیندهای مختلف تبدیل، وجود دارد. در کل تولید سوخت از زیست توده لیگنوسلولزی کار سختی است و بازده پایینی دارد, بنابراین دو فاکتور مهم "بازده بالا" و هزینه پایین باید مدنظر قرار گیرد که تا حد امکان, بهینه‌سازی شوند. روش‌های اصلی تبدیل زیست‌توده به انرژی به دو دسته کلی ترموشیمیایی و بیوشیمیایی تقسیم می‌شوند[۸]. تبدیل ترموشیمیایی زیست توده از طریق فرآیندهایی مانند پیرولیز، گازی کردن و احتراق مستقیم انجام می‌شود که منجر به تولید انرژی و سایر محصولات می‌گردد. با به‌کارگیری روش‌های ترموشیمیایی، زیست توده لیگنوسلولزی می‌تواند در مدت زمان کوتاهی به زیست‌سوخت تبدیل شود. به‌عنوان مثال، زمان موردنیاز برای پیرولیز سریع، پیرولیز کند و مایع‌سازی هیدروترمال[6] به‌ترتیب ۳ تا ۵ ثانیه، ۳۰ تا ۱۸۰ دقیقه و ۹۰ دقیقه است[۱۷-۲۰]. در طی فرآیندهای پیرولیز و مایع‌سازی هیدروترمال، انتشار آلاینده‌ای رخ نمی‌دهد که این امر، این فرآیندها را دوست‌دار محیط زیست می‌کند.

[1] Green House Gases(GHG)
[2] Biomass
[3] agricultural residues
[4] bioenergy
[5] Sugarcane Bagasse
[6] HTL (Hydrothermal liquefaction)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

محدودیت اصلی فرآیندهای پیرولیز و گازی‌کردن، نیاز به کاهش رطوبت و اندازه ذرات مواد اولیه برای دست‌یابی به بازده تبدیل بالاتر است. هم‌چنین، قیر تولیدشده در این فرآیندها باید قبل از ورود به موتورها از گاز سنتز[1] حذف شود تا از انسداد سیستم جلوگیری شود. در نتیجه، پیش‌تیمار مواد اولیه و پس‌تیمار زیست‌سوخت‌های تولیدشده از طریق پیرولیز و گازی‌کردن ضروری است که این امر نه‌تنها هزینه سرمایه‌گذاری سیستم را افزایش می‌دهد، بلکه هزینه عملیاتی آن را نیز بالا می‌برد[۲۱-۲۴]. امروزه بخش عمده‌ای از انرژی زیستی از طریق احتراق مستقیم زیست‌توده تولید می‌شود که عمدتاً برای تأمین نیازهای گرمایشی و آشپزی مورداستفاده قرار می‌گیرد که این امر منجر به آلودگی محیط زیست می‌شود پس استفاده موثر از زیست‌توده با به‌کارگیری فناوری‌های مناسب، هم به رفع تقاضای روند رو به رشد انرژی از طریق سوخت‌های تجدیدپذیر کمک می‌کند و هم در کاهش گازهای گلخانه‌ای موثر خواهد بود[۸]. تبدیل بیوشیمیایی از میکروارگانیسم‌ها برای تبدیل زیست‌توده به زیست‌سوخت و محصولات زیستی استفاده می‌کند. فرآیندهای هضم بی‌هوازی، تخمیر و کمپوست‌سازی برای تبدیل زیست‌توده به زیست‌سوخت و بیومواد از طریق مسیر بیوشیمیایی به‌کار گرفته می‌شوند. محدودیت اصلی روش تبدیل بیوشیمیایی، عدم توانایی در پردازش مواد اولیه با زمان ماند هیدرولیکی[2] بالا و انتشار گازهای گلخانه‌ای در طی فرآیند است. هم‌چنین، نیاز به پیش‌تیمار زیست‌توده قبل از ورود به فرآیند تبدیل بیوشیمیایی، پیچیدگی سیستم را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، در فرآیند تخمیر، پس از پیش‌تیمار، مواد اولیه باید تحت هیدرولیز آنزیمی قرار گیرند تا پلی‌ساکاریدها به مونوساکاریدها تبدیل شوند[۲۵-۲۷]. در جدول (۱) جزئیات فرآیندهای مختلف تبدیل زیست توده را از جمله شرایط عملیاتی، محصولات حاصل و بازده تولید آن‌ها ارائه شده است.

جدول ۱- روش‌های تبدیل زیست‌توده به انرژی

روش تبدیل	فرایند	شرایط عملیات		محصولات	راندمان	منبع
		دما (°C)	فشار (MPa)			
ترموشیمیایی	پیرولیز	۸۰۰-۳۰۰	-	روغن زیستی	۸۰-۶۰(Wt%)	[۲۰] [۲۴]
				زغال زیستی	۳۰-۲۰(Wt%)	
				کاز سنتز	۲۵-۲۰(Wt%)	
	مایع‌سازی هیدروترمال	۳۷۴-۲۵۰	۲۲-٤	روغن زیستی	۴۸-۱۵(Wt%)	
				زغال زیستی	-	
				کاز سنتز	-	
	گازی‌کردن	۱۵۰۰-۸۰۰	-	کاز سنتز	۲/۱-۱ $m3.Kg^{-1}$	[۲۶]
				زغال زیستی	۳۵-۲۰ $g.Kg^{-1}$	
				قیر	۱۳ $g.Kg^{-1}$	
	احتراق مستقیم		-	انرژی حرارتی	۱۹-۱۴$Mj.Kg^{-1}$	[۲۸]
بیوشیمیایی	تخمیر غیرهوازی	۳۷-۳۵	-	گاز زیستی	۳۴۰-۳۸۰$mL.g^{-1}$	[۲۷]
				ماده باقیمانده[3]	-	
	تخمیر	۳۶-۲۸	-	اتانول	۰/۷۱-۰/۷۹l/Kg	[۲۹]
				متانول	۰/۷$mL.g^{-1}$	[۳۰]
				بوتانول	۰/۴$g.g^{-1}$	[۳۱]
				اسیدهای چرب	۰/۱ -۰/۹$g.g^{-1}$	[۳۲-۳۵]

[1] syngas
[2] HRT
[3] Digestate

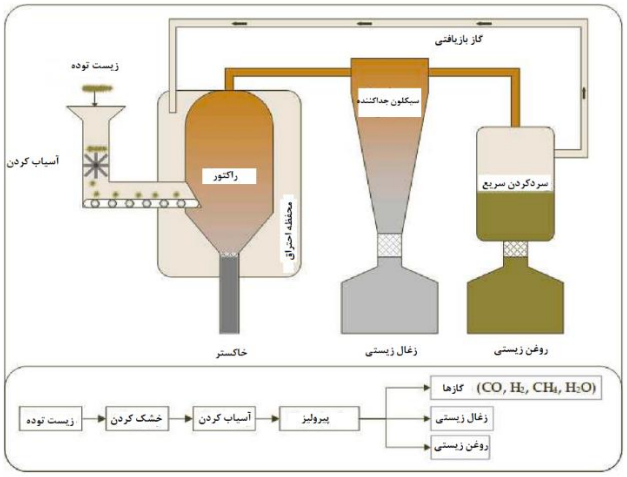
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

در این مقاله علاوه بر روش‌های نامبرده، به یک روش فیزیکی-ترموشیمیایی به نام ساخت بریکت از باگاس هم اشاره شده است که هم به افزایش کیفیت باگاس و هم مشکل حمل و نقل باگاس را در نظر می‌گیرد و یک روش تبدیل انرژی در نظر گرفته نمی‌شود بلکه بخشی از روش‌هایی مانند احتراق مستقیم در نظر گرفته می‌شود. افزایش تقاضای جهانی برای انرژی، همراه با نگرانی‌های فزاینده درباره تغییرات آب‌وهوایی و کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، ضرورت توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر و پایدار را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این میان، زیست‌توده به‌ویژه باگاس نیشکر به‌عنوان یک محصول فرعی فراوان و با ارزش، پتانسیل قابل توجهی برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. با توجه به مزایای قابل توجه، سازگاری با طبیعت، حفاظت از محیط‌زیست و دست‌یابی به انرژی پایدار، در این مقاله مروری به بررسی روش‌های تولید انرژی از باگاس پرداخته می‌شود.

۲-روش‌های ترموشیمیایی

۲-۱- پیرولیز

پیرولیز فرآیندی است که در آن مواد آلی تحت تجزیه حرارتی در عدم حضور اکسیژن قرار می‌گیرند و به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین روش‌های ترموشیمیایی برای تبدیل زیست‌توده به سوخت زیستی موردتوجه قرار گرفته است زیرا امکان تنظیم ویژگی‌های ماده اولیه را به منظور دست‌یابی به حداکثر بازده تبدیل انرژی فراهم می‌کند. پیرولیز می‌تواند به‌صورت مستقل انجام شود یا به‌عنوان مرحله اولیه و کلیدی در فرآیندهای گازی‌کردن و احتراق عمل کند و به سه محصول اصلی زغال جامد[1]، مایع قابل تقطیر (مایع پیرولیز) و گاز غیرقابل تقطیر(عمدتاً H_2، CO، CO_2 و CH_4) تبدیل شوند (شکل ۱). توزیع نسبی این محصولات به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی پیرولیز از جمله دما، نرخ گرمایش و زمان ماند جامد قرار دارد. نسبت محصولات جامد و گازی و ترکیب گازهای تولید شده به‌شدت وابسته به شرایط عملیاتی و نوع ماده اولیه است. از این‌رو، با کنترل پارامترهای پیرولیز زیست‌توده مانند دما، نرخ گرمایش و زمان ماند می‌توان ترکیب نهایی محصولات حاصل از گازی‌کردن و احتراق را به‌طور مؤثر تنظیم کرد [۹، ۳۶-۳۸].



شکل ۱- شماتیک فرایند پیرولیز [۸]

[1] char

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

پیرولیز بر اساس نرخ گرمایش به سه روش اصلی تقسیم می‌شود: پیرولیز کند، پیرولیز سریع و پیرولیز فوق سریع[1]. زیست‌توده در پیرولیز کند (اولین روش توسعه‌یافته) با نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه تا دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شود[۳۹]. این فرآیند چندین ساعت طول می‌کشد تا زیست‌توده به زیست‌سوخت و سایر محصولات تبدیل شود. هدف اصلی پیرولیز کند حداکثرسازی تولید زغال به‌عنوان محصول اصلی است[۳۶ و ۴۰] این فرآیند معمولاً در محدوده دمایی ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود و بازدهی در حدود ۲۵ تا ۳۵ درصد وزنی برای زغال و ۳۰ تا ۵۰ درصد برای محصول مایع گزارش شده است[۴۱]. در مقابل، پیرولیز سریع زمان بسیار کمی برای تبدیل نیاز داشته و به‌طور گسترده در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش زمان گرمایش ۲ تا ۳ ثانیه و نرخ گرمایش ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه است[۲۰]. درصد محصولات حاصل از پیرولیز سریع به‌ترتیب در محدوده ۶۰ تا ۷۵ درصد برای زیست‌نفت، ۱۵ تا ۲۵ درصد برای زیست‌زغال و ۱۰ تا ۲۰ درصد برای گاز سنتز قرار دارد. با این حال، پیرولیز سریع نیازمند خردایش اولیه زیست‌توده است تا گرما به‌طور یکنواخت به تمام قسمت‌ها برسد. از سوی دیگر، در پیرولیز فوق سریع، نرخ و دمای گرمایش بسیار بالاتر است که منجر به بازده تولید روغن زیستی در محدوده ۷۰ تا ۷۵ درصد می‌شود[۲۱].

نیشکر یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی جهان است که سهمی معادل ۲۱/۱ درصد از کل تولیدات گیاهی سراسر جهان را به خود اختصاص داده است[۴۲]. در فرآیند صنعتی فرآوری نیشکر، باگاس به‌عنوان یک محصول فرعی تولید می‌شود که به‌دلیل محتوای بالای مواد آلی، پتانسیل قابل توجهی برای تولید بیوانرژی دارد. با این‌حال، به‌عنوان یک محصول فصلی، دسترسی به باگاس در فواصل خارج از فصل برداشت نیشکر تنها از طریق ذخیره‌سازی ممکن است. از آن‌جاکه باگاس خاصیت هیگروسکوپیک دارد، در طول نگه‌داری مستعد جذب رطوبت و در نتیجه تجزیه بیولوژیکی توسط میکروارگانیسم‌ها می‌گردد[۴۳-۴۴]. برای رفع این چالش‌ها، فرآیند تبدیل ترموشیمیایی به‌عنوان راهکاری مؤثر پیشنهاد شده است که از طریق آن باگاس به زغالی غنی از کربن تبدیل می‌شود. این محصول نه‌تنها پایداری بالایی در طول زمان دارد، بلکه بدون افت محسوس انرژی، قابلیت نگهداری طولانی‌مدت را فراهم می‌کند[۴۵].

Boer و همکاران (۲۰۲۱) باگاس نیشکر را به‌عنوان ماده اولیه در یک رآکتور بستر ثابت تحت فرآیند پیرولیز آهسته برای تولید زغال و مایع پیرولیز قرار دادند. آزمایش‌ها در دماهای ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، نرخ‌های گرمایش ۱ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و زمان‌های نگه‌داری ۳۰ و ۶۰ دقیقه انجام شد. بیش‌ترین بازده زغال (۲۸٪/۹۷) و مایع پیرولیز (۵۵٪/۴۶) به‌ترتیب در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه به‌دست آمد. مایع پیرولیز حاصله حاوی ترکیبات فعال زیستی از جمله اسید استیک، فورفورال و مشتقات فنولی بود که فعالیت ضدقارچی قوی نشان داد. به‌طوری که غلظت‌های ۰/۲ و ۰/۲۵ درصد (حجمی/حجمی) به‌ترتیب سبب مهار کامل رشد *Coniophora puteana* و *Trametes versicolor* شدند. هم‌چنین، تیمار کاغذ صافی با ۱۰٪ مایع پیرولیز منجر به مرگ ۱۰۰٪ موریانه‌ها و کاهش شدید مصرف کاغذ (۵/۶۵ تا ۷/۰۳ درصد) گردید. یافته‌ها نشان می‌دهند که مایع پیرولیز باگاس نیشکر پتانسیل بالایی به‌عنوان عامل طبیعی در فرمولاسیون مواد محافظت‌کننده چوب در برابر عوامل بیولوژیکی دارد[۴۵]. Muigai و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی ویژگی‌های سینتیکی پیرولیز مخلوط‌هایی از نیلوفر آبی[2] و باگاس نیشکر پرداختند. آن‌ها اشاره کردند که داده‌های موجود در ادبیات علمی درباره تجزیه سینتیکی زیست‌توده‌های ترکیبی حاوی دو یا چند جزء بسیار محدود است. از دستگاه TGA برای انجام پیرولیز استفاده شد و نرخ گرمایش در محدوده ۸ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و محدوده دمایی ۱۵۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم گردید. نتایج آزمایش‌ها حضور تعاملات سینرژیک بین اجزای تشکیل‌دهنده زیست‌توده در فرآیند پیرولیز را نشان داد که منجر به

[1] Flash Pyrolysis
[2] Thevetia peruviana

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

تغییرات قابل توجهی در انرژی فعال‌سازی و سینتیک تبدیل مخلوط شد. تعیین شد که حداکثر نرخ پیرولیز مخلوط‌ها در دمای ۳۲۰ تا ۳۴۱ درجه سانتی‌گراد (بسته به ترکیب و نسبت اجزا) حاصل می‌شود[۴۶].

تحقیقاتی در مورد پیرولیز باگاس نیشکر انجام شده است که اغلب در مورد پارامترهای پیرولیز و شناسایی محصولات آن (مانند زغال زیستی، روغن زیستی و گاز) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیقات نشان داده است که پارامترهای بهینه برای تولید بازده بالای زغال، در نرخ گرمایش بین ۲ تا ۱۶ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و در دمایی بالاتر از ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد حاصل می‌شود، که در این محدوده دمایی به ویژه بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد، کاهش قابل توجهی در جرم مواد اولیه رخ می‌دهد[۳۷ و ۴۷].

۲-۲- مایع‌سازی هیدروترمال

باگاس نیشکر به‌عنوان یک محصول جانبی مهم از فرآوری نیشکر، منبعی غنی و تجدیدپذیر برای تولید انرژی است. باگاس نیشکر یک منبع زیست‌توده فراوان و ارزان در جهان است که به‌دلیل ترکیب یکنواخت و خواص پایدارش مورد توجه قرار گرفته است. محققان به دنبال تبدیل این پسماند کشاورزی به روغن‌ها و مواد شیمیایی ارزشمند هستند تا از آن در تولید محصولات با ارزش افزوده بالا استفاده کنند[۴۸]. مایع‌سازی هیدروترمال به‌عنوان یک فناوری نویدبخش برای تبدیل زیست‌توده به سوخت‌های مایع مطرح است. این فرآیند بر خلاف پیرولیز، نیاز به آب‌گیری کامل خوراک ندارد و از این طریق از اتلاف انرژی جلوگیری می‌کند[۴۹]. روغن‌زیستی حاصل از مایع‌سازی هیدروترمال، دارای انرژی بالاتری نسبت به روغن‌های پیرولیز است. ارزش حرارتی روغن‌های زیستی حاصل از باگاس بسته به شرایط عملیاتی می‌توانند به مقادیر تقریبی ۳۳ تا ۳۶ مگاژول بر کیلوگرم هم برسد این درحالی است که ارزش حرارتی بالای باگاس خام حدود ۱۷ مگاژول بر کیلوگرم است[۵۰-۵۱]. با این‌حال، روغن‌زیستی تولید شده از زیست‌توده بدون کاتالیست، به‌دلیل محتوای اکسیژن بالا، ویسکوزیته و اسیدیته زیاد، به‌طور مستقیم قابل استفاده نیست[۵۲] . بنابراین، استفاده از کاتالیست‌هایی مانند NaOH و ZSM-5 برای بهبود کیفیت روغن‌زیستی تولیدی ضروری است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از کاتالیست‌ها در فرآیند مایع‌سازی هیدروترمال باگاس نیشکر، کیفیت روغن‌زیستی را به‌طور چشم‌گیری افزایش داده و آن‌را به سوختی کارآمدتر تبدیل می‌کند[۵۳]. Yan و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر متغیرهای مختلف فرآیند مایع‌سازی هیدروترمال از جمله دما، زمان واکنش، نسبت خوراک باگاس به آب، غلظت کاتالیست سدیم‌هیدروکسید و مقدار کاتالیست ZSM-5 بر بازده و کیفیت روغن‌زیستی حاصل از باگاس نیشکر را بررسی کردند. نتایج نشان داد که حداکثر بازده روغن‌زیستی (۴۶٪/۹) در دمای ۲۸۵ درجه سانتی‌گراد و زمان واکنش ۳۰ دقیقه به‌دست می‌آید و افزایش دما و زمان بیش از حد مجاز، منجر به کاهش بازده روغن‌زیستی به‌دلیل بازپلیمریزاسیون و تجزیه ثانویه به محصولات گازی می‌شود. افزودن هیدروکسیدسدیم باعث کاهش قابل توجه بازده پسماند و افزایش بازده مواد آلی محلول در آب (OD) شد. هم‌چنین، حضور این کاتالیست باعث کاهش بازده ترکیبات اسیدی و فورفورال‌ها در روغن‌زیستی شد. استفاده از کاتالیست ZSM-5 به‌طور مؤثری ترکیبات اسیدی روغن‌زیستی را کاهش داده و خواص آن‌را بهبود می‌بخشد. با این‌حال، استفاده از مقادیر بیش از حد این کاتالیست می‌تواند باعث مسدود شدن منافذ آن و کاهش فعالیتش شود. روغن‌زیستی تولیدی حاوی مقادیر فراوانی از ترکیبات اکسیژن‌دار مانند فنل‌ها، اسیدها، کتون‌ها، آلکن‌ها و استرها بود. در کل، این مطالعه نشان داد که باگاس نیشکر به‌عنوان یک منبع زیست‌توده فراوان، پتانسیل بالایی برای تبدیل به روغن‌زیستی با کیفیت از طریق مایع‌سازی گرمابی دارد. استفاده از کاتالیست‌هایی مانند NaOH و ZSM-5 به‌طور قابل توجهی کیفیت روغن‌زیستی را با کاهش محتوای اکسیژن و افزایش ارزش حرارتی آن بهبود می‌بخشد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که انتخاب دقیق پارامترهای فرآیند و کاتالیست‌ها برای به حداکثر رساندن بازده و کیفیت روغن‌زیستی ضروری است[۵۳].

اگرچه باگاس خام دارای ارزش حرارتی حدود ۱۷ مگاژول بر کیلوگرم است، اما روغن‌زیستی حاصل از آن می‌تواند به ارزش حرارتی ۳۳ تا ۳۶ مگاژول بر کیلوگرم برسد. این افزایش قابل توجه در ارزش حرارتی، کارایی و چگالی انرژی بیش‌تر آن را نشان

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

می‌دهد و آن را به یک سوخت تجدیدپذیر برتر تبدیل می‌کند[۵۴]. Jimenez Forero و همکاران در سال ۲۰۲۲ مایع‌سازی هیدروترمال باگاس نیشکر به‌منظور تولید روغن زیستی، را یک فرآیند امیدبخش معرفی کردند. نتایج مطالعه نشان داد که حلال‌های مورد استفاده در این فرآیند، نقش مهمی در پایداری محصول نهایی دارند. این پژوهش با استفاده از آزمایش پیرسازی تسریع‌شده، تأثیر سه نوع حلال (مخلوط اتانول/آب، گلیسرول خام/آب و آب به تنهایی) را بر پایداری روغن‌زیستی بررسی کرده است. یافته‌ها حاکی از آن است که مخلوط اتانول/آب پایدارترین روغن‌زیستی را تولید می‌کند، به‌طوری‌که روغن‌های حاصل از آن حتی پس از پیرسازی نیز دارای ارزش حرارتی بالا و خواص حرارتی نزدیک به دیزل هستند. این پایداری به واکنش‌های آلکیلاسیون، استریفیکاسیون و استال‌سازی نسبت داده می‌شود. این مطالعه نتیجه‌گیری می‌کند که با انتخاب مناسب حلال، می‌توان روغن زیستی با کیفیت خوب و ماندگاری طولانی (تا ۸ سال) تولید کرد که برای ذخیره‌سازی و انتقال به پالایشگاه‌ها مناسب است[۵۴].

۲-۳- گازی‌کردن[1]

گازی‌کردن زیست‌توده به‌عنوان روشی نویدبخش برای تولید انرژی پایدار مطرح است و یکی از روش‌های شایع تبدیل ترموشیمیایی زیست‌توده است که به دلیل بازده بالای انرژی و قابلیت تولید گاز قابل استفاده، مورد توجه ویژه قرار دارد. این فرآیند شامل یک سری واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی چند مرحله‌ای است که در آن زیست‌توده در محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و در حضور عامل گازساز، به گاز سنتز تبدیل می‌شود[۵۵ و ۵۶]. گاز تولیدشده عمدتاً از ترکیباتی مانند هیدروژن(H_2) ، مونوکسید کربن(CO) ، دی‌اکسید کربن(CO_2) ، متان (CH_4) و مقادیر کمی هیدروکربن‌های سبک تشکیل شده است. هم‌چنین، حضور ناخالصی‌هایی نظیر ترکیبات نیتروژن‌دار و گوگردی، ذرات جامد و به ویژه قیر، از چالش‌های کیفی این گاز محسوب می‌شود. این گاز سنتز می‌تواند به‌عنوان سوخت برای تولید برق یا به‌عنوان ماده اولیه برای تولید سوخت‌های مایع و مواد شیمیایی ارزشمند استفاده شود[۵۷]. دمای گازی‌کردن یکی از مهم‌ترین پارامترهای عملیاتی است که به‌شدت بر کیفیت و کمیت گاز سنتز تأثیر می‌گذارد. با افزایش دما از ۷۵۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، غلظت گازهای قابل احتراق اصلی(H_2 و CO) به‌طور قابل توجهی افزایش و تولید قیر کاهش می‌یابد. این امر ناشی از تسریع واکنش‌های گازی‌کردن $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ و ($C + CO_2 \rightarrow 2CO$) در دماهای بالاتر است[۵۸-۶۰]. ترکیب نهایی گاز سنتز به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی، نوع و ترکیب شیمیایی زیست‌توده، نوع عامل گازساز و طراحی رآکتور (گازساز) قرار دارد[۵۵]. عوامل گازساز متداول شامل هوای اتمسفریک، اکسیژن خالص، بخار آب، دی‌اکسیدکربن یا ترکیبی از این مواد هستند که انتخاب هر یک بسته به هدف فرآیند و نوع زیست‌توده متفاوت است. استفاده از بخار آب به جای هوا، گاز سنتزی با محتوای هیدروژن و ارزش گرمایی بالاتری تولید می‌کند[۵۵ و ۵۷]. Nam و همکارانش (۲۰۲۵) از کربنی‌سازی هیدروترمال یا HTC[2] (در محیط آبی تحت دما و فشار بالا) در محیط دی‌اکسیدکربن به‌عنوان پیش تصفیه باگاس استفاده کردند تا ترکیبات آلی پیچیده باگاس تجزیه شود و با تغییر ساختار آن فرایند گازی‌سازی را بهبود بخشند چون این کار باعث افزایش یکنواختی باگاس، ارزش حرارتی و چگالی انرژی می‌شود. نتایج نشان داد HTC در محیط دی‌اکسیدکربن در مقایسه با محیط نیتروژن باعث افزایش محتوی کربن ثابت (حدود ۵درصد وزنی)، ارزش حرارتی بالا (حدود ۲ مگاژول بر کیلوگرم) و کاهش محتوی خاکستر (حدود ۲درصد وزنی) شد. در این شرایط سرعت گازی‌سازی (۴۱۰ ثانیه) در شرایط یکسان به‌طور چشم‌گیری سریع‌تر از باگاس خام (۶۵۰ ثانیه) بود و غلظت H_2 و CO حدود ۵٪ افزایش یافت[۶۱]. فرآیند گازی‌سازی تنها به تولید گاز سنتز محدود نمی‌شود، بلکه محصولات جانبی ارزشمندی مانند زغال‌زیستی، سوخت‌های‌زیستی مایع، گرما و انرژی الکتریکی نیز تولید می‌کند[۶۲]. با این‌حال، تولید

[1] **Gasification**
[2] Hydrothermal Carbonization

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

قیر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های این فرآیند شناخته می‌شود. قیر علاوه بر کاهش کیفیت گاز سنتز و کاهش بازده سیستم، می‌تواند در خطوط انتقال گاز رسوب کند و منجر به انسداد، خوردگی و افت عملکرد تجهیزات شود[۸ و ۶۳].

باگاس به‌دلیل داشتن محتوای بالای ترکیبات سلولزی و ارزش حرارتی در حدود ۱۶ مگاژول بر کیلوگرم، یک خوراک بالقوه ارزشمند برای تولید انرژی محسوب می‌شود[۶۴-۶۵]. یکی از روش‌های مناسب استفاده از این پسماند، گازی‌کردن است که طی آن مواد کربنی به گازسنتزی غنی از CO و H_2 تبدیل می‌شوند[۶۶]. گاز سنتز می‌تواند در تولید حرارت و توان یا ارتقاء به‌عنوان سوخت حمل‌ونقل به‌کار رود. تاکنون بیش‌ترین خوراک مورد استفاده در گازی‌کردن زیست‌توده، چوب بوده است[۶۷]. با این‌حال، با توجه به رقابت در استفاده از منابع چوبی و نگرانی‌های زیست‌محیطی، استفاده از منابع جایگزین مانند باگاس ضرورت بیش‌تری یافته است. Nguyen و همکاران (۲۰۲۲) تحول ویژگی‌های زغال حاصل از باگاس نیشکر در طی فرآیند گازی‌سازی را مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌های باگاس پس از آماده‌سازی و پیرولیز در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، تحت شرایط گازی‌سازی در یک راکتور ماکرو ترموگراویمتری[1] (۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، مخلوط گازی حاوی ۲۰ درصد CO_2 و ۲۰ درصد H_2O در نیتروژن) قرار گرفتند. تحلیل‌های SEM-EDS ، رامان، FT-IR و جذب–واجذب نیتروژن برای بررسی تغییرات مورفولوژی، ساختار کربنی، گروه‌های عاملی و ویژگی‌های بافتی[2] انجام شد. نتایج نشان داد که بیش از ۷۵ درصد زغال طی ۳۰۰ ثانیه تبدیل شد و فرآیند کامل گازی‌سازی طی ۷۰۰ ثانیه به پایان رسید که نشان‌دهنده سرعت بالای واکنش باگاس نسبت به سایر زیست‌توده‌ها است. بررسی‌ها بیانگر تغییرات چشمگیر مورفولوژی و ساختار کربن در مراحل اولیه گازی‌سازی ($X < 0.5$) و پایداری نسبی آن در مراحل پایانی بود. مساحت سطح ویژه زغال از ۴۰۸ به ۸۷۷ مترمربع بر گرم افزایش یافت و حجم کل حفرات نیز از ۰/۱۸ به ۰/۴۹ سانتی‌متر مکعب بر گرم رسید، که مقادیر آن با کربن‌های فعال تجاری قابل مقایسه است. این نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای پسماندهای گازی‌سازی باگاس به‌عنوان جاذب ارزان و کارآمد CO_2 بوده و می‌تواند به توسعه سیستم‌های گازی‌سازی پایدار و بدون پسماند کمک کند[۵۶]. در پژوهش Anukam و همکاران (۲۰۱۵)، باگاس نیشکر را پس از خشک‌کردن و آسیاب، در یک کوره الکتریکی و در شرایط بی‌هوازی تحت گرمایش در سه دمای ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار دادند تا تأثیر دما بر ویژگی‌های سوختی و قابلیت استفاده در گازی‌سازی بررسی شود. نتایج نشان داد که با افزایش دما، بازده جرمی جامد کاهش یافت اما بازده انرژی به‌دلیل افزایش محتوای کربن بهبود پیدا کرد. آنالیز مقدماتی و نهایی بیانگر کاهش رطوبت و مواد فرار، افزایش چشم‌گیر خاکستر (به ویژه در ۳۰۰ درجه سانتیگراد)، افزایش درصد کربن و ارزش حرارتی (از ۱۷/۳ به ۲۰/۲ MJ/kg) بود. تحلیل‌های حرارتی (TGA) نشان دادند که بخش عمده‌ای از همی‌سلولز و بخشی از سلولز در دماهای بالاتر تجزیه شده و این امر موجب پایداری بیش‌تر خوراک در گازی‌سازی می‌شود. هم‌چنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دادند که با افزایش دما، ساختار الیافی باگاس تخریب و متخلخل‌تر شد و تجمع عناصری مانند سیلیسیم و فسفر افزایش یافته که می‌تواند در گازی‌کردن صنعتی منجر به مشکلات خاکستر گردد. این نتایج به‌طور کلی نشان دادند که گرمایش پیش‌فرآیندی باگاس در دماهای بالا، به ویژه ۳۰۰ درجه سانتیگراد، کیفیت آن را به‌عنوان خوراک گازی‌کردن بهبود می‌دهد، هرچند کنترل خاکستر در این شرایط ضروری است[۵۷].

در نهایت فرآیند گازی‌کردن شامل مجموعه‌ای از واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی چندمرحله‌ای است که در محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و در حضور یک عامل گازساز، زیست‌توده را به گاز سنتز تبدیل می‌کند[۵۵]. ترکیب نهایی گاز سنتز، که عمدتاً از H_2، CO، CO_2 و CH_4 تشکیل شده، به‌شدت تحت تأثیر چندین پارامتر عملیاتی قرار دارد:

[1] Macro-Thermogravimetry
[2] Textural properties

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

۱. دما: دمای گازی‌کردن یکی از مهم‌ترین پارامترها است. افزایش دما (معمولاً در محدوده ۷۰۰-۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) به‌طور قابل‌توجهی باعث افزایش غلظت گازهای قابل احتراق اصلی (H_2 و CO) و بهبود کیفیت گاز سنتز می‌شود. این امر ناشی از تسریع واکنش‌های گازی‌کردن است[۵۸-۵۹].

۲. عامل گازساز: نوع عامل گازساز نیز حیاتی است. استفاده از بخار آب به جای هوا، منجر به تولید گاز سنتزی با محتوای هیدروژن و ارزش گرمایی بالاتری می‌شود[۵۷]. عوامل گازساز متداول شامل هوای اتمسفریک، اکسیژن خالص، بخار آب، دی‌اکسید کربن، یا ترکیبی از این مواد هستند[۵۵]. میزان نسبت بخار به سوخت در گازی‌کردن با بخار و یا نسبت استوکیومتریک در گازی‌کردن با هوا نیز از پارامترهای بحرانی هستند که برای بهینه‌سازی باید به دقت تنظیم شوند[۵۷].

۳. کاتالیزورها و طراحی رآکتور: علاوه بر پارامترهای عملیاتی، استفاده از کاتالیزورها (مانند کاتالیزورهای مبتنی بر مس و روی که توسط پتاسیم موجود در خاکستر باگاس تقویت می‌شوند) به‌عنوان روشی مؤثر برای کاهش چشم‌گیر تولید قیر[1] و بهبود کیفیت گاز سنتز شناخته شده است[۶۸].

۲-۴- احتراق مستقیم

زیست‌توده در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، پتانسیل چشم‌گیری برای توسعه منابع انرژی پایدار دارد. با این وجود، غالباً بهره‌برداری از آن از طریق احتراق مستقیم صورت می‌گیرد. این شیوه، به‌دلیل چگالی و ارزش حرارتی پایین زیست‌توده لیگنوسلولزی، تنها راندمان محدودی (۱۵٪–۵٪) ارائه می‌دهد[۶۹]. لذا، تبدیل باقی‌مانده‌های زیست‌توده به فرم‌های متمرکز انرژی می‌تواند کارایی استفاده از این منبع را به نحو چشم‌گیری بهبود بخشد[۴۵]. احتراق زیست‌توده با چالش‌های فناوری متعددی همراه است که از جمله می‌توان به ارزش حرارتی پایین ماده اولیه، حضور ناخالصی‌های غیرقابل احتراق و محتوای رطوبت بالا اشاره کرد. احتراق ناقص زیست‌توده در کوره‌های بخار، می‌تواند منجر به تشکیل توده‌های چسبیده[2]، رسوب خاکستر و تشکیل سرباره[3] بر روی سطوح انتقال حرارت شود که عمدتاً ناشی از کمبود اکسیژن و واکنش‌های ذوب‌شدنی در دمای بالا است. برای غلبه بر این مسائل، فناوری‌های احتراق پیشرفته معمولاً مستلزم آماده‌سازی زیست‌توده (از جمله خشک‌کردن، گرانوله‌سازی یا پیش‌تیمار ترموشیمیایی) قبل از احتراق هستند[۷۰].

عوامل متعددی مانند دبی جرمی سوخت، ضریب هوای اضافی، روش احتراق (مانند لایه ثابت، لایه سیال یا سوزاندن پودری) و دمای محفظه احتراق روی عملکرد احتراق زیست‌توده تأثیر می‌گذارند. در فرآیندهای ترموشیمیایی، محصولات تجزیه حرارتی زیست‌توده در دو دسته عمده گازی و جامد قرار می‌گیرند مانند مواد فرار (مانند دی‌اکسید کربن، مونوکسیدکربن، هیدروکربن‌های سبک، هیدروژن و قیرها)، رطوبت، نیمه‌زغال[4] و خاکستر. ترکیب و بازده این محصولات به‌شدت وابسته به شرایط عملیاتی مانند دما، نرخ گرمایش و زمان ماند است[۷۱-۷۲].

از آن‌جایی‌که در حال حاضر سوخت‌های فسیلی هم‌چنان نقش غالب در تأمین انرژی جهان دارند و ذغال‌سنگ به‌دلیل فراوانی ذخایر و هزینه نسبتاً پایین، جایگاه مهمی دارد و براساس آمار سال ۲۰۱۴، ذخایر ثبت شده جهانی برای بیش از یک قرن پاسخ‌گوی نیاز انرژی خواهند بود[۷۳]. یکی از رویکردهای نوین، احتراق هم‌زمان[5] ذغال‌سنگ و زیست‌توده است که با کاهش انتشار CO_2، اکسیدهای نیتروژن (NOx) و گوگرد (SOx)، راهکاری عملی برای کاهش آلایندگی‌های زیست‌محیطی فراهم

[1] Tar
[2] agglomerates
[3] slag
[4] semi-coke
[5] co-combustion

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

می‌آورد[۷۴-۷۵]. هرچند احتراق زیست‌توده نیز منجر به انتشار CO_2 می‌گردد، اما بخشی از آن در چرخه فتوسنتز مجدداً جذب می‌شود. بنابراین تراز خالص کربن پایین‌تری نسبت به سوخت‌های فسیلی دارد[۷۶]. با این‌حال، محدودیت‌هایی نظیر فصلی‌بودن تولید، رطوبت بالا، ارزش حرارتی پایین و چگالی کم، از موانع اصلی استفاده گسترده از زیست‌توده به شمار می‌روند. راهکار مؤثر برای غلبه بر این چالش‌ها، بهره‌گیری از احتراق هم‌زمان زغال‌سنگ–زیست‌توده است که علاوه بر کاهش انتشار CO_2، بر انتشار NOx و SOx نیز اثر کاهشی دارد[۷۷-۷۸]. نتایج پژوهش‌در این زمینه نشان داده است که افزودن ۲۰٪ زیست‌توده به مخلوط زغال‌سنگ می‌تواند حدود ۱۸٪ از انتشار CO_2 بکاهد[۷۹]. با این‌حال، میزان کاهش انتشار و ویژگی‌های سینتیکی احتراق به نوع زیست‌توده و شرایط فرایندی وابسته است[۸۰-۸۱]. برای نمونه، Gil و همکاران (۲۰۱۰) کاهش انرژی فعال‌سازی احتراق زغال‌سنگ را در حضور ۵–۲۰٪ زیست‌توده گزارش کردند. مطالعات مشابهی بر روی شرایط احتراق اکسیژنی[1] نیز وجود دارد که نشان می‌دهند این فناوری می‌تواند در کنترل واکنش‌های گرمازا و جذب CO_2 مؤثر باشد تحقیقات نشان داده‌اند که کارایی احتراق اکسیژنی به ترکیب فیزیکی–شیمیایی مواد اولیه وابسته است و نمی‌توان یک الگوی ثابت برای همه سیستم‌ها ارائه داد[۸۰]. بنابراین، تحقیقات بیش‌تر برای تعیین نسبت بهینه زیست‌توده و شرایط فرایندی مناسب ضروری است. در این زمینه، فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند جذب و ذخیره‌سازی کربن[2] توسعه یافته‌اند. یکی از روش‌های نویدبخش، احتراق سوخت اکسیژنی است که با استفاده از اکسیژن خالص یا ترکیبی از اکسیژن و دی‌اکسیدکربن بازیافتی انجام می‌شود و غلظت دی‌اکسیدکربن در گازهای خروجی را تا ۹۵٪ افزایش می‌دهد، به‌طوری‌که امکان جداسازی و ذخیره‌سازی مستقیم فراهم می‌گردد این فناوری که ابتدا در دهه ۱۹۸۰ برای بازیافت نفت مطرح شد، امروزه به‌عنوان ابزاری مؤثر در کاهش انتشار آلاینده‌ها و افزایش بازده احتراق مورد توجه قرار گرفته است [۸۲-۸۷].

۳- روش‌بیوشیمیایی

۳-۱-تخمیر (بیواتانول)

افزایش تقاضای جهانی انرژی و کاهش تدریجی ذخایر نفت، جستجو برای منابع جایگزین انرژی را ضروری ساخته است، به‌ویژه منابعی که از مواد تجدیدپذیر مانند زیست‌توده به‌دست می‌آیند[۸۸]. نگرانی جهانی نسبت به تغییرات اقلیمی و نیاز ناشی از آن برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده از بیواتانول[3] حاصل از تخمیر قندهای موجود در زیست توده را به‌عنوان جایگزین یا افزودنی برای بنزین تشویق کرده است[۸۹]. تولید بیواتانول از باگاس به‌عنوان یک سوخت زیستی نسل دوم، یکی از راهکارهای مهم برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است[۹۰]. مهم‌ترین مزیت بیواتانول نسبت به سایر سوخت‌های جایگزین، مانند هیدروژن این است که به‌راحتی در سیستم‌های سوخت‌رسانی امروزی می‌تواند در مخلوط با بنزین مورد استفاده قرار گیرد و در نتیجه نیازی به ایجاد تغییرات در سیستم‌های سوخت‌رسانی وسایل نقلیه وجود ندارد[۹۱]. بیواتانول یک منبع انرژی جدید و تجدیدپذیر است و نسل دوم محسوب می‌شود. این امر به این دلیل است که مواد اولیه بیواتانول نسل اول عموماً از منابع غذایی (مانند ساکارو**ز** موجود در نیشکر و چغندر قند و نشاسته‌ی ذرت و گندم) تأمین می‌شوند. تنوع‌بخشی به مواد اولیه مورد استفاده در فرآیند تولید بیواتانول می‌تواند از طریق استفاده از منابع غیرغذایی یا ضایعات (باگاس نیشکر و کاه) انجام شود. توسعه فرآیند تولید بیواتانول از منابع غیرغذایی محلی یا ضایعات، می‌تواند امنیت انرژی و ارزش افزوده این منابع را افزایش دهد[۹۲-۹۳]. نیشکر تاکنون کارآمدترین ماده خام برای تولید بیواتانول محسوب می‌شود، زیرا مصرف انرژی فسیلی در فرآیند تولید بیواتانول از نیشکر بسیار کم‌تر از تولید آن از ذرت است[۹۴]. برای استفاده از باگاس نیشکر به‌عنوان ماده خام در تولید بیواتانول، باید آن

[1] oxy-fuel combustion
[2] Carbon Capture and Sequestration (CCS)
[3] Bioethanol

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

را پردازش کرد تا قندهای قابل تخمیر به‌دست آیند[۹۵]. در این راستا، یک مرحله پیش‌تیمار [1] لازم است تا لیگنین و همی‌سلولز از سلولز جدا شوند، بلورینگی [2] سلولز کاهش یابد و تخلخل باگاس افزایش پیدا کند و بدین ترتیب هیدرولیز سلولز بهبود یابد[۹۶].

بر این اساس فرآیند تولید بیواتانول از باگاس نیشکر شامل مراحل زیر است: (۱) پیش‌تیمار؛ (۲) هیدرولیز آنزیمی؛ (۳) تخمیر؛ (۴) تقطیر؛ و (۵) حذف رطوبت. ترکیب اصلی باگاس نیشکر شامل سلولز، همی‌سلولز و لیگنین است. باگاس نیشکر نیازمند فرآیند پیش‌تیمار است تا لیگنین و همی‌سلولز از سلولز جدا شوند، بلورینگی سلولز کاهش یابد و هیدرولیز سلولز تسهیل گردد. چندین نوع فرآیند پیش‌تیمار وجود دارد که شامل موارد زیر می‌شوند: (۱) پیش‌تیمار فیزیکی؛ (۲) پیش‌تیمار اسیدی؛ (۳) پیش‌تیمار قلیایی؛ (۴) پیش‌تیمار ارگانوسالو؛ (۵) اکسیداسیون مرطوب و (۶). انفجار بخار. پیش‌تیمار فیزیکی، فرآیند تغییر اندازه فیزیکی باگاس نیشکر به ابعاد کوچک‌تر است. پیش‌تیمار شیمیایی، فرآیند جداسازی لیگنین و همی‌سلولز از سلولز با استفاده از ترکیبات اسیدی است. در این پیش تیمار از مواد شیمیایی مانند اسید فسفریک، اسید هیدروکلریک، کلرید فریک، اسید سولفوریک و اسید سیتریک استفاده می‌شود که مزیت آن، درجه بالای حلالیت‌پذیری همی‌سلولز است. ولی از مواد شیمیایی خورنده، سمی و خطرناک استفاده می‌شود که می‌تواند از معایب آن محسوب شود پیش‌تیمار قلیایی، فرآیند جداسازی لیگنین و همی‌سلولز از سلولز با استفاده از ترکیبات قلیایی است که باعث کاهش بلورینگی سلولز، تجزیه ساختار سلولزی و جداسازی کربوهیدرات‌ها از لیگنین می‌شود. مزیت آن کارایی بالایی در فرآیند حذف لیگنین است ولی در غلظت‌های بالای عوامل قلیایی احتمال تخریب و تجزیه پلی‌ساکاریدها وجود دارد پیش‌تیمار ارگانوسالو، پیش‌تیمار لیگنوسلولزی با استفاده از حلال‌های آلی است. این روش دارای انتخاب‌پذیری بالایی در حذف لیگنین است، ولی به‌دلیل نیاز این فرآیند در فشار بالا ممکن است از نظر ایمنی و هزینه چالش‌برانگیز باشد. انفجار بخار به‌دلیل استفاده از مواد غیرسمی، از درجه بالایی در حلالیت‌پذیری همی‌سلولز برخوردار است، اما شرایط واکنش آن شامل دما و فشار بالا است. اکسیداسیون مرطوب، فرآیندی است که در آن زیست‌توده با آب، اکسیژن یا هوای فشرده تحت تیمار قرار می‌گیرد. این پیش تیمار نیز با استفاده از مواد غیرسمی، حلالیت‌پذیری بالایی از همی‌سلولز را فراهم می‌کند، اما محصولات جانبی آن شامل اولیگومرها است که نیازمند فرآیندهای تکمیلی برای تجزیه بیش‌تر هستند انفجار بخار، فرآیندی است که ساختار پیچیده باگاس نیشکر را با استفاده از بخار از هم گسیخته می‌کند. در بین تمام این روش‌ها، انفجار بخار از برتری نسبی برخوردار است، چون علاوه بر داشتن درجه بالای حلالیت‌پذیری همی‌سلولز و زمان واکنش کوتاه، از مواد سمی نیز استفاده نمی‌کند. این ویژگی‌ها آن را به یکی از مؤثرترین و پایدارترین روش‌های پیش‌تیمار در تولید بیواتانول از مواد لیگنوسلولزی مانند باگاس نیشکر تبدیل کرده است [۹۳ و ۸۸]. Parveen و همکاران (۲۰۲۳) از باگاس برای تولید بیواتانول طی سه مرحله پیش‌تیمار، هیدرولیز و تخمیر استفاده کردند. پیش‌تیمار قلیایی با استفاده از سدیم‌هیدروکسید (NaOH) به‌عنوان یک روش مؤثر برای تخریب ساختار لیگنوسلولزی و افزایش دسترسی آنزیم‌ها به سلولز معرفی کردند و آنرا نسبت به پیش‌تیمار اسیدی در جایگاه بهتری شناختند چون تولید مهارکننده‌ها و مشکلات خوردگی کم‌تری ایجاد می‌کند پس از پیش‌تیمار، هیدرولیز آنزیمی با استفاده از آنزیم‌های سلولاز، قندهای قابل تخمیر را آزاد می‌کند. در نهایت، از مخمر *Saccharomyces cerevisiae* به‌طور گسترده‌ای برای تخمیر این قندها به اتانول استفاده می‌شود[۹۰]. این مخمر به‌دلیل تحمل بالا به اتانول و طولانی‌تر بودن محدوده پ.هاش. مناسب برای رشد برتری قابل توجهی دارد. متغیرهایی مانند پ.هاش.، زمان انکوباسیون و غلظت تأثیر مثبت معناداری بر تولید اتانول دارند[۹۷-۹۸].

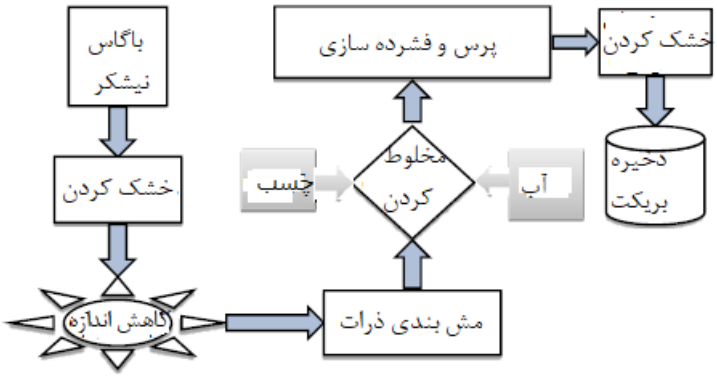
۴-بریکت‌سازی

بریکت‌سازی یک فرایند فیزیکی-ترموشیمیایی یا تراکمی است و قبل از احتراق یا سایر فرایندهای حرارتی انجام می‌گیرد به‌همین دلیل به‌عنوان بخشی از زنجیره احتراق مستقیم هم درنظر گرفته می‌شود. تبدیل باگاس به بریکت‌های [3] سوختی یک روش مؤثر

[1] Pre-treatment
[2] Crystallinity
[3] Briquettes

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

برای چگال‌سازی زیست‌توده (شکل۲) و بهبود ویژگی‌های سوختی آن است این فناوری با کاهش حجم و چگالی کم باگاس، مشکلات حمل و نقل و ذخیره‌سازی را حل می‌کند و آن را به یک سوخت جامد چگال‌شده با عملکرد بهتر تبدیل می‌کند. پیش‌تیمار حرارتی (کلسیناسیون) باگاس در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، یک روش کلیدی برای بهبود کیفیت بریکت است. این فرآیند منجر به کاهش محتوای رطوبت و مواد فرار، و در نتیجه افزایش ارزش گرمایی می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که بریکت‌های ساخته شده از باگاس کلسینه شده، ارزش گرمایی به‌طور متوسط حدود ۲۶/۶ مگاژول بر کیلوگرم دارند، که به‌طور قابل توجهی بالاتر از بریکت‌های ساخته شده از باگاس معمولی (حدود ۱۶/۵ مگاژول بر کیلوگرم) است. این بهبود ناشی از غنی‌سازی نسبی کربن و حذف ترکیبات فرار غنی از اکسیژن است. افزودن مواد چسباننده طبیعی مانند لیگنین و پرکننده‌هایی مانند پودر باگاس نیز برای افزایش مقاومت فشاری و کاهش محتوای خاکستر بریکت‌ها ضروری است[۹۹].



شکل ۲-فرایند تولید بریکت [۱۰۰]

برای ارزیابی پتانسیل ساخت بریکت از باگاس تحقیقاتی انجام گرفته است. Mekonen و همکاران (۲۰۲۴) به تولید و بررسی ویژگی‌های بریکت‌های باگاس نیشکر پرداختند. فرآیند تولید بریکت با نسبت‌های مختلف چسب (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) و اندازه ذرات (با میانگین ۰,۷۵، ۲,۷۷۵ و ۴,۸ میلی‌متر) و با استفاده از چسب‌های متفاوت شامل کود گاوی، کاغذ باطله و مخلوطی از ملاس و کاغذ باطله انجام شد. مراحل کار شامل خشک‌کردن، کاهش اندازه ذرات، سرند کردن، افزودن چسب و فشرده‌سازی با پرس دستی بود. در نهایت، ویژگی‌های فیزیکی و احتراقی مانند دانسیته، مقاومت در برابر شکست، آنالیز مقدماتی (رطوبت، خاکستر، مواد فرّار و کربن ثابت) و ارزش حرارتی بر اساس استاندارد ASTM بررسی شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین دانسیته بریکت‌ها ۰,۸۰۴ گرم بر سانتیمترمکعب بوده است. مقاومت در برابر شکست بین ۸۳/۰۵۱ تا ۹۴/۹۷۵ درصد (نمونه با ۴,۸ میلی‌متر و ۵ درصد کود گاوی و نمونه با ۰,۷۵میلی‌متر و ۵ درصد چسب ترکیبی ملاس و کاغذ باطله) متغیر بود. تحلیل آماری ANOVA نشان داد که عوامل مورد مطالعه و تعامل میان آن‌ها اثر معنی‌دار ($p < 0.05$) بر خواص فیزیکی داشته‌اند. پارامترهای بهینه شامل :٪۱۴,۹۵۳ چسب ترکیبی، اندازه ذره ۰,۷۷۶ میلی‌متر، دانسیته ۰,۸۰۵ g/cm^3 و مقاومت شکست ٪۹۵,۸۱۱ بودند. بریکت‌های باگاس با ۵ درصد کود گاوی بیش‌ترین ارزش حرارتی را به‌میزان ۳۹/۹۲۷ kcal/kg داشتند. در آنالیز نهایی نیز ترکیب عنصری بریکت شامل ۴۷,۴۹ درصد کربن، ۵,۱۳۳ درصد هیدروژن، ۱,۵۵۷درصد نیتروژن، ۰,۳۷۴ درصد گوگرد و ۴۵,۴۴۶ درصد اکسیژن بود. بنابراین، بریکت‌های باگاس نیشکر دارای ارزش حرارتی بالا بوده و قابلیت جایگزینی سوخت‌های فسیلی و چوب در کاربردهای مختلف را دارند. هم‌چنین، به‌دلیل فراوانی این ماده خام، استفاده از آن به‌عنوان سوخت می‌تواند مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی داشته باشد[۱۰۰].

Getu و همکاران (۲۰۲۱) با هدف به تولید بریکت از باگاس با ارزش حرارتی بالا به منظور حفاظت از محیط زیست در برابر آلودگی اقدام کردند. نمونه باگاس از کارخانه قند ونجی جمع‌آوری و در یک محیط کم اکسیژن در آزمایشگاه مرکز توسعه و

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

ترویج انرژی روستایی اتیوپی در آدیس‌آبابا کربنیزه شد. مواد کربنیزه شده با خاک رس و شیره قند[1] به‌عنوان چسب در نسبت‌های مختلف مخلوط و با استفاده از دستگاه اکستروژن به بریکت تبدیل شدند. ارزش حرارتی بریکت‌های تولید شده از باگاس با استفاده از خاک رس و شیره قند به‌ترتیب در محدوده ۴/۰۶۴-۳/۵۲۹ و ۴/۴۴۲ -۳/۹۶۴ کالری بر گرم گزارش شد. بالاترین ارزش حرارتی با استفاده از خاک رس به نسبت ۲۰:۸۰ و کم‌ترین ارزش حرارتی با استفاده از شیره قند به نسبت ۲۵:۷۵ حاصل شد. تحلیل‌های بیش‌تر نشان داد که با تبدیل باگاس کارخانه قند ونجی به بریکت، سالانه کارخانه می‌تواند $3/1\times10^{10}$ کالری انرژی تولید کرده و معادل ۱۳/۰۱ متر مکعب هیزم جایگزین کند یا بین ۰,۱۳ تا ۰,۱۶ هکتار از جنگل‌های گرمسیری را از تخریب نجات دهد و پتانسیل جذب بین ۱۷,۹۰ تا ۲۲,۰۳ تن کربن در سال را دارد. در نهایت، مطالعه نتیجه‌گیری کرد که بریکت‌های تولید شده از باگاس می‌توانند به‌عنوان یک منبع انرژی با کیفیت و گزینه‌ای مناسب برای مدیریت ضایعات صنایع قند مورد استفاده قرار گیرند[۱۰۱].

Brunerová و همکاران (۲۰۲۰) کاربرد فناوری بریکت‌سازی با فشار بالا[2] را در مدیریت ضایعات فرآوری نیشکر در ویتنام بررسی کردند. برای این کار پارامترهای سوخت و ارزیابی قابلیت آن برای احتراق مستقیم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تحلیل پارامترهای سوخت نشان داد که کیفیت باگاس نیشکر بالا است، با محتوای خاکستر پایین (۰,۹۷ درصد) و ارزش حرارتی بالا ($18/35 MJ\cdot kg^{-1}$)، ارزش حرارتی پایین ($17/06 MJ\cdot kg^{-1}$)، که نشان‌دهنده مناسب بودن آن برای فرآیندهای احتراق مستقیم است. از نظر ویژگی‌های مکانیکی، دارای دوام مکانیکی ۹۹,۲۹ درصد، مقاومت فشاری،[1] $150,82 N.mm^{-1}$ و چگالی حجمی $1022,44 kg.m^{-3}$ بود که همه این شاخص‌ها نتایج مثبت را نشان می‌دهند. به‌طور کلی، نتایج به دست آمده نشان‌دهنده مناسب بودن باگاس نیشکر برای ارزش‌افزایی در تولید سوخت بریکت زیستی با استفاده از فناوری بریکت‌سازی با فشار بالا است. در نهایت، تحلیل این زیست‌توده ضایعاتی پتانسیل بالای آن برای بازیابی انرژی را نشان داد و مزیت ارزش‌افزایی آن در چارچوب فناوری‌های پایدار را تأیید کرد[۱۰۲].

سوخت بریکت[3] نسبت به مواد خام مزایای بیش‌تری دارد، در وهله‌ی اول سوختی تجدیدپذیر است، نسبت به سایر منابع سوخت جامد ارزش حرارتی بالاتری دارد، نسبت به زغال، خاکستر کم‌تری دارد (۲–۱۰ درصد در مقابل ۲۰–۴۰ درصد) و بهتر از زغال می‌سوزد [۱۰۳]. بریکت‌ها در مناطق روستایی و شهری برای مصارف خانگی و صنعتی مانند پخت و پز، تولید بخار، آسیاب روغن و تولید کاشی استفاده می‌شوند[۱۰۴].

روش‌های مختلف بازیابی انرژی از باگاس نیشکر از جنبه‌های اقتصادی، مصرف انرژی، زمان فرآیند و کارایی، تفاوت‌های قابل توجهی دارند. احتراق مستقیم ساده‌ترین و رایج‌ترین روش است که عمدتاً در کارخانه‌های قند برای تولید بخار و برق به‌کار می‌رود، اما به‌دلیل ارزش حرارتی نسبتاً پایین باگاس خام (حدود ۱۶–۱۲ مگاژول بر کیلوگرم)، رطوبت بالا و تشکیل سرباره و رسوب خاکستر، راندمان محدودی (۵–۱۵ درصد) دارد و نیازمند فناوری‌های پیشرفته‌تری مانند احتراق همزمان یا احتراق اکسیژنی برای کاهش آلاینده‌ها و بهبود بازده است. در مقابل، گازی‌کردن باگاس در دمای ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، گاز سنتز غنی از هیدروژن و مونوکسیدکربن تولید می‌کند که قابلیت استفاده در تولید برق، حرارت و سوخت‌های مایع را دارد، هرچند چالش اصلی آن تولید قیر است که نیاز به پس‌تیمار و فیلتراسیون دارد و هزینه سیستم را افزایش می‌دهد. پیرولیز نیز روشی انعطاف‌پذیر است که بسته به نوع آن (کند، سریع یا فوق‌سریع) محصولات مختلفی مانند زغال زیستی، روغن زیستی و گاز تولید می‌کند. پیرولیز سریع تنها در ۲–۳ ثانیه انجام می‌شود و بازده روغن زیستی را تا ۷۵ درصد افزایش می‌دهد، ولی نیازمند خردایش اولیه زیست‌توده است. مایع‌سازی هیدروترمال در دمای پایین‌تر (۲۵۰ تا ۳۷۴ درجه سانتی‌گراد) و بدون نیاز به خشک‌کردن کامل خوراک، باگاس را به روغن زیستی با ارزش حرارتی بالا (۳۳ تا ۳۶ مگاژول بر کیلوگرم) تبدیل می‌کند و با

[1] molasses
[2] high-pressure briquetting
[3] briquette fuel

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

استفاده از کاتالیست‌هایی مانند NaOH یا ZSM-5، کیفیت روغن و پایداری آن را بهبود می‌بخشد، هرچند هزینه کاتالیست‌ها و فرآیند پیچیده‌تر، از جنبه اقتصادی نیاز به بررسی دارند. در حوزه بیوشیمیایی، تخمیر برای تولید بیواتانول نیازمند مراحل پیش‌تیمار گسترده (مانند انفجار بخار یا پیش‌تیمار قلیایی)، هیدرولیز آنزیمی و تخمیر است که پرهزینه و زمان‌بر است و تولید ترکیبات مهارکننده، چالش اضافی در مقیاس صنعتی ایجاد می‌کند. در مقابل، بریکت‌سازی به‌عنوان یک روش فیزیکی-ترموشیمیایی ساده و کم‌هزینه، با فشرده‌سازی باگاس و افزودن چسب‌های طبیعی (مانند ملاس یا لیگنین)، ارزش حرارتی را تا ۲۶/۶ مگاژول بر کیلوگرم افزایش داده و مشکلات حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی را کاهش می‌دهد و محصولی با خاکستر کم‌تر از زغال (۲–۱۰ در مقابل ۲۰–۴۰ درصد) و کاربرد گسترده در صنعت و خانگی ایجاد می‌کند. بنابراین، انتخاب روش بهینه باید براساس تحلیل جامع اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی و با در نظر گرفتن اهداف کاربردی، زیرساخت‌های محلی و پتانسیل منطقه‌ای (مانند فراوانی باگاس در خوزستان) انجام شود.

جمع‌بندی نهایی

در این مطالعه، راهکارهای تبدیل باگاس نیشکر به انرژی از طریق فرایندهای مایع‌سازی هیدروترمال، تولید بیواتانول، احتراق مستقیم، گازی‌کردن و پیرولیز مورد بررسی قرار گرفت. هر یک از این فرآیندها با بهره‌گیری از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی مناسب باگاس، پتانسیل تولید انرژی پایدار، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و مدیریت پسماند نیشکر (باگاس) را نشان دادند[۱۵].

باگاس نیشکر، به‌عنوان یک زیست‌توده فراوان و ارزان، با استفاده از فناوری مایع‌سازی هیدروترمال می‌تواند به روغن‌زیستی با ارزش حرارتی بالا (۳۶–۳۳ مگاژول برکیلوگرم) تبدیل شود[۵۴]. این فرآیند بدون نیاز به خشک‌کردن کامل خوراک، در دمای متوسط و با کمک کاتالیست‌هایی مانند NaOH وZSM-5 ، کیفیت روغن را با کاهش اکسیژن و اسیدیته بهبود می‌بخشد و حداکثر بازده (۴۶/۹درصد) را در ۲۸۵ درجه سانتی‌گراد و ۳۰ دقیقه فراهم می‌کند[۵۳]. انتخاب حلال مناسب (مانند اتانول/آب) نیز پایداری روغن را افزایش داده و آن را برای ذخیره و انتقال مناسب می‌سازد[۵۴]. بنابراین، مایع‌سازی هیدروترمال با بهینه‌سازی پارامترها و کاتالیست‌ها، راهکاری کارآمد برای تبدیل باگاس به سوخت زیستی پایدار است. به‌عنوان مثال ارزش حرارتی بالای (HHV) تفاله‌ی نیشکر حدود ۱۷ مگاژول بر کیلوگرم است، در حالی‌که ارزش حرارتی روغن‌های زیستی حاصل ازآن بسته به شرایط عملیاتی می‌توانند به مقادیر تقریبی ۳۳ تا ۳۶ مگاژول بر کیلوگرم برسند. این افزایش قابل‌توجه در HHV روغن زیستی نسبت به زیست‌توده اولیه، بیانگر کارایی و چگالی انرژی بالاتر آن بوده و پتانسیل بالای آن را به‌عنوان یک سوخت تجدیدپذیر برتر، به‌ویژه از منظر میزان انرژی ذخیره شده به ازای واحد جرم، برجسته می‌سازد[۵۰-۵۱].

فرآیند تولید بیواتانول به‌عنوان یک روش بیوشیمیایی، امکان تولید سوخت مایع تجدیدپذیر از قندهای قابل تخمیر موجود در سلولز و همی‌سلولز باگاس را فراهم می‌کند[۸۸ و ۹۰]. پیش‌تیمارهای مؤثر مانند پیش‌تیمار قلیایی و انفجار بخار، با تخریب ساختار لیگنوسلولزی و افزایش دسترسی آنزیم‌ها به سلولز، بازده تولید اتانول را بهبود می‌بخشند[۹۳ و ۹۶]. با این‌حال، پیچیدگی فرآیند، نیاز به پیش‌تیمارهای گسترده و تولید ترکیبات مهارکننده، چالش‌های اقتصادی و فنی این روش را در مقیاس صنعتی افزایش می‌دهند[۹۵ و ۹۷].

بریکت‌سازی به‌عنوان یک روش فیزیکی-ترموشیمیایی ساده و کم‌هزینه، با فشرده‌سازی باگاس و افزودن چسب‌های طبیعی (مانند لیگنین یا ملاس)، سوختی با چگالی حجمی بالا و ارزش حرارتی بهبودیافته تولید می‌کند[۹۹]. این فرآیند مشکلات حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی و احتراق ناکارآمد را کاهش داده و باگاس را به یک سوخت جامد رقابتی تبدیل می‌کند که می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای زغال یا چوب در کاربردهای حرارتی مورد استفاده قرار گیرد[۱۰۰ و ۱۰۲]. این فرایند بخشی از روش‌های حرارتی مانند احتراق مستقیم محسوب می‌شود.

احتراق مستقیم، ساده‌ترین و رایج‌ترین روش تولید انرژی از باگاس است که به‌طور گسترده در کارخانه‌های شکر برای تولید بخار و تولید برق استفاده می‌شود[۶۹]. با این‌حال، این روش به‌دلیل ارزش حرارتی نسبتاً پایین (حدود ۱۷ مگاژول بر کیلوگرم)، محتوای رطوبت بالا و حضور عناصر خاکستری (مانند پتاسیم و سیلیسیم)، با چالش‌هایی مانند تشکیل سرباره، رسوب خاکستر

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

و گرفتگی مواجه است[۷۱-۷۰]. بهره‌برداری از فناوری‌های پیشرفته احتراق (مانند احتراق در لایه سیال یا احتراق هم‌زمان[1] با زیست‌توده و احتراق سوخت اکسیژنی می‌تواند بازده حرارتی را افزایش داده و انتشار آلاینده‌ها (به‌ویژه CO_2، NOx و SOx) را کاهش دهد[۷۴، ۷۵ و ۸۰]. این فناوری‌ها ضمن حفظ کارایی، امکان جذب و ذخیره‌سازی کربن را فراهم کرده و احتراق باگاس را به یک فرآیند پایدارتر تبدیل می‌کنند[۸۳ و ۸۵].

گازی‌کردن، به‌عنوان یک فرآیند ترموشیمیایی پیشرفته، با تبدیل باگاس به گاز سنتز غنی از H_2 و CO، امکان تولید انرژی الکتریکی، حرارتی و سوخت‌های مایع را فراهم می‌کند[۵۶-۵۵]. این فرآیند با بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی (مانند دما، نوع عامل گازساز و استفاده از کاتالیزور) می‌تواند بازده انرژی بالایی داشته باشد[۵۹-۵۸]. استفاده از بخار به جای هوا، منجر به تولید گاز سنتزی با محتوای هیدروژن و ارزش گرمایی بالاتر می‌شود[۵۷]. با این‌حال، تولید قیر به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی، نیاز به پس‌تیمار گاز و فیلتراسیون پیچیده دارد که هزینه سیستم را افزایش می‌دهد[۸ و ۶۳].

پیرولیز نیز به‌عنوان یک روش انعطاف‌پذیر، امکان تولید هم‌زمان سه محصول ارزشمند زغال زیستی، روغن زیستی و گاز را فراهم می‌کند[۱۰ و ۳۶]. پیرولیز کند منجر به تولید حداکثری زغال شده که می‌تواند در بهبود خاک یا به‌عنوان سوخت جامد استفاده شود، در حالی‌که پیرولیز سریع و فوق سریع تمرکز بر تولید روغن زیستی با بازده بالا دارند[۴۰-۴۱]. علاوه بر کاربردهای انرژی، مایع پیرولیز حاصل از باگاس دارای ترکیبات فعال زیستی (مانند فورفورال و فنول‌ها) با خاصیت ضدقارچی و ضدحشره‌ای قوی است که پتانسیل استفاده در صنایع حفاظت از چوب و کشاورزی را دارد[۴۵-۴۶].

در این تحقیق به‌خاطر دست‌یابی به انرژی پایدار و اقتصادی کم‌کربن برای کاهش گازهای گلخانه‌ایی به اهمیت روزافزون و امکان استفاده از باگاس نیشکر برای تولید انرژی اشاره شده است. با وجود پیشرفت‌هایی در این زمینه هنوز چالش‌هایی مانند نیاز به افزایش راندمان تبدیل انرژی، تضمین امکان‌سنجی اقتصادی در مقیاس صنعتی و ضرورت وجود حمایت‌های سیاسی وجود دارد. ادامه فعالیت‌های پژوهشی گسترده و همکاری‌های هماهنگ بین دانشگاه‌ها، صنعت و دولت برای غلبه بر این موانع ضروری است. تولید انرژی از باگاس نیشکر در شرایط کنونی انرژی جهانی به‌عنوان یک مسیر امیدبخش برای دست‌یابی به انرژی پاک و پایدار مطرح است و برای دست‌یابی به تمامی مزایای آن به یک رویکرد هماهنگ، هدفمند و راهبردی نیاز است.

در مجموع، هر یک از این فرآیندها با توجه به اهداف کاربردی، شرایط عملیاتی بهینه و زیرساخت‌های منطقه‌ای، قابلیت بهره‌برداری اقتصادی و زیست‌محیطی از باگاس نیشکر را دارند با توجه به فراوانی این پسماند کشاورزی در منطقه‌ای مانند استان خوزستان، توسعه واحدهای پیش‌پردازش چندمحصولی می‌تواند به‌عنوان پلی بین تولیدکنندگان مواد اولیه و فناوری‌های تبدیل، نقش کلیدی در ایجاد زنجیره ارزش زیست‌توده ایفا کند. این رویکرد نه‌تنها به کاهش ضایعات و آلودگی‌های زیست‌محیطی منجر می‌شود، بلکه با ایجاد محصولات با ارزش افزوده، به توسعه اقتصاد چرخشی و انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران کمک شایانی خواهد نمود. بنابراین، انتخاب فناوری مناسب باید مبتنی بر تحلیل جامع اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی باشد تا بیش‌ترین بازده و پایداری در بلندمدت حاصل شود.

مراجع

[1] IPCC, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.

[2]F. I. da S. Aires, I. S. Freitas, K. M. dos Santos, R. da S. Vieira, D. N. Dari, P. G. de Sousa Junior, L. F. Serafim, A. Á. M. Ferreira, C. G. da Silva, É. D. L. da Silva, L. A. S. de Oliveira, L. M. S. de Castro, L. A. Oliveira, M. T. B. dos Santos, J. H. da S. Felix, P. da S. Sousa, F. Simão Neto, and J. C. S. dos Santos, Sugarcane Bagasse as a Renewable Energy Resource: A Bibliometric Analysis of Global

[1] co-combustion

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

Research Trends, ACS Sustainable Resource Management, 2 (2025) 1551–1561. doi:[10.1021/acssusresmgt.5c00253](https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.5c00253).

[3] Q. Wang, M., Su, R., Li, P., Ponce, The effects of energy prices, urbanization and economic growth on energy consumption per capita in 186 countries, J. Clean. Prod., 225(2019) 1017–1032.

[4] S. Shahsavari, S. M., Sadrameli, Production of renewable aromatics and heterocycles by catalytic pyrolysis of biomass resources using rhenium and tin promoted ZSM-5 zeolite catalysts, Process Saf. Environ. Prot., 141(2020) 305–320.

[5] W. Kaminski, J., Marszalek, A., Ciolkowska, Renewable energy source – Dehydrated ethanol, Chem. Eng. J., 135(2008) 95–102.

[6] A. Demirbas, Biofuels securing the planet's future energy needs, Energy Convers. Manag., 50 (2009) 2239–2249.

[7] P. Guo, W., Song, J., Buhain, Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective, Renew. Sustain. Energy Rev., 42(2015) 712–725.

[8] M. K. Awasthi, T., Sar, S. C., Gowd, K., Rajendran, V., Kumar, S., Sarsaiya, Y., Li, R., Sindhu, P., Binod, Z., Zhang, A., Pandey, and M. J., Taherzadeh, A comprehensive review on thermochemical and biochemical conversion methods of lignocellulosic biomass into valuable end product, *Fuel*,342(2024) 127790. doi: 10.1016/j.fuel.2024.130785.

[9] A. Kerolli-Mustafa, I., Malollari, V., Lajqi-Makolli, S., Berisha–Shala, and L., Latifi, Biomass and biofuel overview: a global sustainability challenge, J. Environ. Prot. Ecol., 16(2015) 222–232.

[10] M. A. Soria, D., Barros, and L. M., Madeira, Hydrogen production through steam reforming of bio-oils derived from biomass pyrolysis: Thermodynamic analysis including in situ CO_2 and/or H_2 separation, Fuel, 244(2019) 184–195. doi: 10.1016/j.fuel.2019.01.156.

[11] V. S. Sikarwar, Z., Ming, P.S., Fennell, N., Shah, E.J., Anthony, Progress in biofuel production from gasification, Prog. Energy Combust. Sci. 61(2017) 189–248.

[12] REN21, Renewables 2024 Global Status Report. https://www.ren21.net/gsr-2024.

[13] F. Galembeck and P. P., Abreu Filho, Perspectives for Biomass Production and Use in Brazil, Rev. Virtual Quim., 9(2017) 274–293. doi: 10.21577/1984-6835.20170018.

[۱۴] محمدنژاد سیگارودی، جعفر؛ شعبانی‌کیا، اکبر و بوغلان دشتی، بهروز (۱۳۸۹). پتانسیل سنجی تولید انرژی از پسماندهای کشاورزی ایران. وزارت نیرو، سازمان انرژی‌های نو ایران. نخستین همایش بیوانرژی ایران، تهران.

[15] O. Sahu, Assessment of sugarcane industry: Suitability for production, consumption, and utilization, Ann. Agrar. Sci., 16(2018) 389–395.

[16] J., Alekasir (1404).https://www.sugarcane.ir/%D8%B1%DA%A9%D9%88%D8%B1%D8%AF-%D8%A8%DB%8C%D8%B3%D8%A7%D8%A8%D9%82%D9%87-%D8%AF%D8%B1-%D8%A8%D8%B1%D8%AF%D8%A7%D8%B4%D8%AA-%D9%86%DB%8C%D8%B4%DA%A9%D8%B1%D8%9B-%D8%A8%DB%8C%D8%B4-%D8%A7/.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

[35] Usmani Z, Sharma M, Awasthi AK, Lukk T, Tuohy MG, Gong L, et al. Lignocellulosic biorefineries: The current state of challenges and strategies for efficient commercialization. Renew Sust Energy Rev 2021;148:111258.
[17]H. Jørgensen, M. Pinelo, Enzyme recycling in lignocellulosic biorefineries, Biofuels, Bioproducts and Biorefining,11 (2017) 150–167 .
[18]Y. Xue, H. Chen, W. Zhao, C. Yang, P. Ma, S. Han, A review on the operating conditions of producing bio-oil from hydrothermal liquefaction of biomass, International Journal of Energy Research, 40 (2016) 865–877 .
[19] B. B. Krishna, B. Biswas, T. Bhaskar, Gasification of lignocellulosic biomass, in Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels (2nd ed.), 12 (2019) 285–300 .
[20]C. Moya, R. Santiago, D. Hospital-Benito, J. Lemus, J. Palomar, Design of biogas upgrading processes based on ionic liquids, Chemical Engineering Journal, 428 (2022) 132103 .
[21]A. S. Al, Comparison of slow and fast pyrolysis for converting biomass into fuel, Renewable Energy, 124 (2018) 197–201.
[22] K. B. Ansari, B. Kamal, S. Beg, M. A. Wakeel Khan, M. S. Khan, M. K. Al Mesfer, et al., Recent developments in investigating reaction chemistry and transport effects in biomass fast pyrolysis: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 150 (2021) 111454 .
[23]R. W. Nachenius, F. Ronsse, R. H. Venderbosch, W. Prins, Biomass pyrolysis, Advances in Chemical Engineering, 42 (2013) 75–139 .
[24]D. C. Elliott, P. Biller, A. B. Ross, A. J. Schmidt, S. B. Jones, Hydrothermal liquefaction of biomass: Developments from batch to continuous process, Bioresource Technology, 178 (2015) 147–156.
[25] C. Birgen, P. Dürre, H. A. Preisig, A. Wentzel, Butanol production from lignocellulosic biomass: revisiting fermentation performance indicators with exploratory data analysis, Biotechnology for Biofuels, 12 (2019) 1–15.
[26]C. Ciliberti, A. Biundo, R. Albergo, G. Agrimi, G. Braccio, I. de Bari, et al., Syngas derived from lignocellulosic biomass gasification as an alternative resource for innovative bioprocesses, Processes, 8 (2020) 1–38.
[27] Z. A. B. Z. Alauddin, P. Lahijani, M. Mohammadi, A. R. Mohamed, Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14 (2010) 2852–2862.
[28] J. S. Lee, C. J. Lin, W. C. Lee, H. Y. Teng, M. H. Chuang, Production of succinic acid through the fermentation of Actinobacillus succinogenes on the hydrolysate of Napier grass, Biotechnology for Biofuels and Bioproducts, 15 (2022) 1–11.
[29]S. Peleteiro, S. Rivas, J. L. Alonso, V. Santos, J. C. Parajó, Utilization of ionic liquids in lignocellulose biorefineries as agents for separation, derivatization, fractionation, or pretreatment, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 63 (2015) 8093–8102 .
[30]S. I. Meramo Hurtado, P. Puello, A. Cabarcas, Technical evaluation of a levulinic acid plant based on biomass transformation under techno-economic and exergy analyses, ACS Omega, 6 (2021) 5627–5641.
[31]O. P. Karthikeyan, C. Visvanathan, Bio-energy recovery from high-solid organic substrates by dry anaerobic bio-conversion processes: a review, Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 12 (2012) 257–284.
[32]A. Oliva, L. C. Tan, S. Papirio, G. Esposito, P. N. L. Lens, Effect of methanol-organosolv pretreatment on anaerobic digestion of lignocellulosic materials, Renewable Energy, 169 (2021) 1000–1012.
[33]D. Brown, J. Shi, Y. Li, Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production, Bioresource Technology, 124 (2012) 379–386.
[34]V. K. Garlapati, A. K. Chandel, S. P. J. Kumar, S. Sharma, S. Sevda, A. P. Ingle, et al., Circular economy aspects of lignin: Towards a lignocellulose biorefinery, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 130 (2020) 109977.
[35]Q. Kang, L. Appels, T. Tan, R. Dewil, Bioethanol from lignocellulosic biomass: Current findings determine research priorities, The Scientific World Journal, 2014 (2014) 298153.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

[36] D. Mohan, C. U., Pittman, and P. H., Steele, Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review, Energy Fuels, 20(2006) pp. 848–889.

[37] M. Carrier, T., Hugo, J., Gorgens, and H., Knoetze, Comparison of slow and vacuum pyrolysis of sugar cane bagasse, J. Anal. Appl. Pyrolysis, 90(2011) 18–26.

[38] D. Neves, H., Thunman, A., Matos, L., Tarelho, and A., Gómez-Barea, Characterization and prediction of biomass pyrolysis products,Prog. Energy Combust. Sci., 37(2011) 611–630.

[39]Z. Usmani, M. Sharma, A. K. Awasthi, T. Lukk, M. G. Tuohy, L. Gong, et al., Lignocellulosic biorefineries: The current state of challenges and strategies for efficient commercialization, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 148 (2021) 111258.

[40] A. V. Bridgwater, Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass, Chem. Eng. J., 91(2003) 87–102.

[41] B. Pecha and M., Garcia-Perez, Pyrolysis of lignocellulosic biomass: Oil, char, and gas, in Bioenergy—Biomass to Biofuels, New York: Academic Press, 2015.

[42] K. A. Figueroa-Rodríguez, F., Hernández-Rosas, B., Figueroa-Sandoval, J., Velasco-Velasco, and N., Aguilar Rivera, What Has Been the Focus of Sugarcane Research? A Bibliometric Overview, Int. J. Environ. Res. Public Health, 16(2019) 3326. doi: 10.3390/ijerph16183326.

[43] J. D. Breccia, L., Bettucci, M., Piaggio, and F., Siñeriz, Degradation of sugar cane bagasse by several white-rot fungi,Acta Biotechnol., 17(1997) 177–184.

[44] X. Q. Dong, J. S. Yang, N. Zhu, E. T. Wang, and H. L. Yuan, Sugarcane bagasse degradation and characterization of three white-rot fungi,Bioresour. Technol., 131(2013) 443–451.

[45] F. D. Boer, J., Valette, J.-M., Commandré, M., Fournier, and M.-F., Thévenon, Slow pyrolysis of sugarcane bagasse for the production of char and the potential of its by-product for wood protection,J. Renew. Mater., 9(2021) 651–667. doi: 10.32604/jrm.2021.013147.

[46] H. H. Muigai, B. J., Choudhury, P., Kalita, and V. S., Moholkar, Co–pyrolysis of biomass blends: Characterization, kinetic and thermodynamic analysis,Biomass Bioenergy, 143(2020) 105839.

[47] S. C. Katyal, K., Thambimuthu, and M., Valix, Carbonisation of bagasse in a fixed bed reactor: Influence of process variables on char yield and characteristics,Renew. Energy, 28(2003) 713–725.

[48] H. M. N., Shaikh, M. A. A., Roslan, and A., Bakhit, The potential of sugarcane bagasse as a raw material for biofuel production, in Proc. Int. Symp. Agric. Biosyst. Eng., 2009.

[49] R. S. Silva, R. A. da Silva Jr., F. M. de Andrade, P. N. Acácio Neto, R. M. do Nascimento, J. M. Santos, L. Stragevitch, M. F. Pimentel, D. A. Simoes, and L. Danielski, Hydrothermal Liquefaction of Sugarcane Bagasse and Straw: Effect of Operational Conditions on Product Fractionation and Bio-Oil Composition, Energies,17(2024)5439.doi:10.3390/en17215439](https://doi.org/10.3390/en17215439).

[50] S. Marx, A.N.E. Laubscher, J.R. Bunt, R.J. Venter, R.C. Uwaoma, C.A. Strydom, Evaluation of Sugar Cane Bagasse Hydrothermal Liquefaction Products for Co-Gasification with Coal as Green Coal Pellet Production. Bioresour. Technol. Rep. 2023, 22, 101503.

[51] o, D.R. Negr, A. Grandis, M.S. Buckeridge, G.J.M. Rocha,. M.R.L.V. Leal, C. Driemeier. Inorganics in Sugarcane Bagasse and Straw and Their Impacts for Bioenergy and Biorefining: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2021, 148, 111268

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

[52] J. Lehto, A. Oasmaa, Y., Solantausta, M., Kyto, and D., Chiaramonti, Review of fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass,Appl. Energy, 116(2014) 178–190. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.11.040.

[53] X. Yan, J., Ma, W., Wang, Y., Zhao, and J., Zhou, The Effect of Different Catalysts and Process Parameters on the Chemical Content of Bio-oils from Hydrothermal Liquefaction of Sugarcane Bagasse," Bioresources, 13(2018) 997–1018. doi: 10.15376/biores.13.1.997-1018.

[54] J. A. Jimenez Forero, T. H. T., Tran, T., Tana, A., Baker, J., Beltrami, W. O. S., Doherty, and L., Moghaddam, Hydrothermal liquefaction of sugarcane bagasse to bio-oils: Effect of liquefaction solvents on bio-oil stability, Fuel, 312(2022) 122793. doi: 10.1016/j.fuel.2021.122793.
[55] Y. Cao, Q., Wang, J., Du, J., Chen, Oxygen-enriched air gasification of biomass materials for high-quality syngas production. Energy Conversion and Management, , 199(2019) 111628.

[56] H. N.,Nguyen, D.A., Khuong, P.L., Tran-Nguyen, and T., Tsubota,.Towards sustainable biomass gasification: Evolution of bagasse char characteristics throughout gasification. Biomass and Bioenergy, 158(2022) 106384.

[57] A. Anukam, S., Mamphweli, P., Reddy, O., Okoh, and E., Meyer, An Investigation into the Impact of Reaction Temperature on Various Parameters during Torrefaction of Sugarcane Bagasse Relevant to Gasification, J. Chem., 2015, 235163. doi: 10.1155/2015/235163.

[58] A., Almeida, P., Neto, I., Pereira, A., Ribeiro, R. Pilão, Effect of temperature on the gasification of olive bagasse particles. Journal of the Energy Institute, 92(2019)153–160. https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.11.006.

[59] M. J., Sheikhdavoodi, M., Almassi, M., Ebrahimi-Nik, A., Kruse, and H., Bahrami, Gasification of sugarcane bagasse in supercritical water; evaluation of alkali catalysts for maximum hydrogen production,J. Energy Inst., 88(2015) 450–458.

[60] P. Ghorbannezhad, M., Dehghani Firouzabadi, and A., Ghasemian, Catalytic fast pyrolysis of sugarcane bagasse pith with HZSM-5 catalyst using tandem micro-reactor GC-MS,Energy Sources, Part A, 39(2017) 1685–1691.

[61] N. H. Nam, L. P. Thu, N. T. Phuong, D. T. Hai, and D. T. M. Thanh, A Combination of Hydrothermal Carbonization under CO_2 and High-Temperature Steam Gasification of Bagasse, Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption,14(2025)1–5.

doi:[10.36795/vjca.v14i1.28] (https://doi.org/10.36795/vjca.v14i1.28).

[62] A. Uzi, Y., Shen, S., Kawi, A., Levy, and C.-H., Wang, Permittivity and chemical characterization of woody biomass during pyrolysis and gasification, Chem. Eng. J., 355(2019) 255–268. doi: 10.1016/j.cej.2018.08.123.

[63] X. Cui, Y. Shen, Q., Yang, S., Kawi, Z., He, X., Yang, and C.-H., Wang, Simultaneous syngas and biochar production during heavy metal separation from Cd/Zn hyperaccumulator (Sedum alfredii) by gasification, Chem. Eng. J., 347(2018) 543–551. doi: 10.1016/j.cej.2018.04.133

[64] C. Mbohwa, Modelling Bagasse Electricity Generation: An Application to the Sugar Industry in Zimbabwe, in Proc. Int. Conf. Adv. Eng. Technol., J. A. Mwakali and G. Taban-Wani, Eds., Oxford: Elsevier (2006) 354–367.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

[65] T. C., Mokhena, M. J., Mochane, T. E., Motaung, L. Z., Linganiso, O. M., Thekisoe, S. P., Songca, Sugarcane bagasse and cellulose polymer composites. Sugarcane-technology and research, 225, 40(2018).

[66] H. N. Nguyen, L. V. D., Steene, D. D., Le, Kinetics of rice husk char gasification in an H2O or a CO2 atmosphere,Energy Sources, Part A, 40(2018) 1701–1713.

[67] H.N. Nguyen, P.L.T., Nguyen, V.B., Tran, Zero-waste biomass gasification: Use of residues after gasification of bagasse pellets as CO2 adsorbents, Thermal Science and Engineering Progress. 26 (2021) 101080. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101080.

[68] A., Tavasoli, M., Aslan, M., Salimi, S., Balou, S. M., Pirbazari, H., Hashemi, K., Kohansal, Influence of the blend nickel/porous hydrothermal carbon and cattle manure hydrochar catalyst on the hydrothermal gasification of cattle manure for H2 production. Energy Conversion and Management, 173(2018) 15-28.

[69] Y., Kuang, Y., Zhang, B., Zhou, C., Li, Y.Cao, L., Li, L., Zeng, A review of renewable energy utilization in islands. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59(2016) 504–513. DOI 10.1016/j.rser.2016.01.014.

[70] N. C. Cruz, F. C., Silva, L. A. C., Tarelho, and S. M., Rodrigues, Critical review of key variables affecting potential recycling applications of ash produced at large-scale biomass combustion plants, Resour. Conserv. Recycl., 150(2019) 104427. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104427.

[71] A. A. Bhuiyan, A. S., Blicblau, A. K. M. S., Islam, and J., Naser, A review on thermo-chemical characteristics of coal/biomass co-firing in industrial furnace,J. Energy Inst., 91(2018) 1–18.

[72] A. A. A., Abuelnuor, M. A., Wahid, S. E., Hosseini, A., Saat, K. M., Saqr, H. H., Sait, M., Osman, Characteristics of biomass in flameless combustion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 33*(2014) 363-370.

[73] BP. (2014). BP Statistical Review of World Energy 2014. BP Global.

[74] D. A. Tillman, Cofiring benefits for coal and biomass,Biomass Bioenergy, 19(2000) 365–381.

[75] P. Basu, Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. Academic Press (2013).

[76] F., Cherubini, GHG balances of bioenergy systems – Overview of key steps in the production chain and methodological concerns. Renewable Energy, 35(2010)1565–1573.

[77] B. M. Jenkins, L. L. Baxter, T. R. Miles, and T. R. Miles, Combustion properties of biomass,Fuel Process. Technol., 54(1998) 17–46.

[78] M., Sami, K., Annamalai, M., Wooldridge, Co-firing of coal and biomass fuel blends. Progress in Energy and Combustion Science, 27(2001)171–214.

[79] L., Shen, Y., Gao, J. Xiao, Co-firing of biomass with coal in oxy-fuel conditions: A thermogravimetric analysis. Energy & Fuels, 24(2010)190–198.

[80] M. V., Gil, D., Casal, C., Pevida, J. J., Pis, F., Rubiera, Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion. Bioresource Technology, 101(2010) 5601–5608.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

[81] G., Lopez, M., Amutio, J., Alvarez, J., Bilbao, M., Olazar, Co-firing of biomass wastes and coal in oxy-fuel conditions: A TG-FTIR study. Fuel, 123(2014) 164–172.

[82] H. L., Friedman, Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry. Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia, 6(1964) 183–195.

[83] H., Liu, R., Zailani, B. M., Gibbs, Comparisons of pulverized coal combustion in air and in mixtures of O_2 /CO_2 . Fuel, 84(2005) 833–840.

[84] G., Lopez, J., Alvarez, M., Amutio, J., Bilbao, M., Olazar, Thermogravimetric analysis of co-firing of coal and biomass under oxy-fuel conditions. Fuel Processing Technology, 110(2013) 108–115.

[85] M. Lopes, C., Thanos, and J., Rueda-Ordoñez, Thermal analysis and kinetic modeling of guarana seed residues under air and oxy-fuel conditions,Renew. Energy, 85(2016) 1271–1281.

[86] M., Hikiri-Akama, S., Tanaka, T., Nakamura, Oxy-fuel co-firing of coal and biomass: Combustion characteristics and environmental performance. Fuel, 199(2017) 295–304.

[87] M. Shi, X., Wang, and Y., Zhang, Combustion kinetics of sugarcane bagasse under oxy-fuel conditions, Bioresour. Technol., 267(2018) 83–89.

[88] R. C. Saxena, D. K., Adhikari, and H. B., Goyal, Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review, Renew. Sustain. Energy Rev., 13(2009) 167–178.

[89] M. Balat, H., Balat, and C., Öz, Progress in bioethanol processing,Prog. Energy Combust. Sci., 34 (2008) 551–573.

[90] F. Parveen, A., Saxena, A., Hussain, K., Muzammil, M., Saeed, N. M., Alabdallah, and M., Ashfaque, Bioethanol Production from Sugarcane Bagasse: Optimization Through Response Surface Methodology and Experimental Validation, Research Square, (2023). doi: 10.21203/rs.3.rs-3475846/v1.

[91] A. A. Kiss and D. J. P. C., Suswalak, Enhanced bioethanol dehydration by extractive and azeotropic distillation in dividing-wall columns,Sep. Purif. Technol., 86(2012) 70–78.

[92] L. Mesa, N., López, C., Cara, E., Castro, E., González, and S. I., Mussatto, Techno-economic evaluation of strategies based on two steps organosolv pretreatment and enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse for ethanol production, Renewable Energy, 86(2016) 270–279. doi: 10.1016/j.renene.2015.07.105.

[93] M. H. Nasution, S., Lelinasari, and M. G. S., Kelana, A review of sugarcane bagasse pretreatment for bioethanol production,IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 963(2021) 012014.

[94] M. Macedo, J., Seabra, and J., Silva, Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020,Biomass Bioenergy, 32(2008) 582–595.

[95] N. Mosier, C., Wyman, B., Dale, R., Elander, Y. Y., Lee, M., Holtzapple, and M., Ladisch, Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass," Bioresour. Technol., 96(2005) 673–686. doi: 10.1016/j.biortech.2004.06.025

[96] C-H.,Kuo, and C-K., Lee, Enhanced enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse by N-methylmorpholine-N-oxide pretreatment. Bioresource Technology, 100(2009) 866-871.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

[97] Y. Lin, W., Zhang, C., Li, K., Sakakibara, S., Tanaka, and H., Kong,, Factors affecting ethanol fermentation using Saccharomyces cerevisiae BY4742,Biomass Bioenergy, 47(2012) 395–401.

[98] S. Prasertwasu, D., Khumsupan, T., Komolwanich, T., Chaisuwan, A., Luengnaruemitchai, and S., Wongkasemjit, Efficient process for ethanol production from Thai Mission grass (Pennisetum polystachion),Bioresour. Technol., 163(2014) 152–159.

[99] M. Siahdashti, M., Talaeipour, H., Khademisiam, and B., Bazyar, Investigation of physical and thermal properties of fuel briquettes made of bagasse,BioResources, 17(2022) 2053–2073.

[100] A. G. Mekonen, G. G., Berhe, M. B., Desta, F. A., Belete, and A. F., Gebremariam, Production and characterization of briquettes from sugarcane bagasse of Wonji Sugar Factory, Oromia, Ethiopia, *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 13(2024). doi: 10.1007/s40243-023-00249-1.

[101] M. E. Getu, B. A., Abebe, M. J., Midekssa, G. T., Araya, E. W., Amare, and G. B., Fedi, Briquette production from sugar cane bagasse and its potential as clean source of energy," African J. Environ. Sci. Technol., 15(2021) 339–348. doi: 10.5897/AJEST2021.3006.

[102] A. Brunerová, H., Roubík, and D., Herák, Briquetting of sugarcane bagasse as a proper waste management technology in Vietnam,Waste Manag. Res., 38(2020). doi: 10.1177/0734242X20938438.

[103] L. Ifa, S., Yani, N., Nurjannah, D., Darnengsih, A., Rusnaenah, M., Mel, M., Mahfud, and H. S., Kusuma, Techno-economic analysis of bio-briquette from cashew nut shell waste, Heliyon, 6(2020) e05009. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05009.

[104] S. Y. Kpalo, M. F., Zainuddin, L. A., Manaf, and A. M., Roslan, A review of technical and economic aspects of biomass briquetting,Sustainability, 12(2020) 4609.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]

Reviewing Approaches for Energy Recovery from Sugarcane Bagasse

Parizad Sheikhi

Institute of Manufacturing Engineering and Industrial Technologies, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran.

Received:summer 2025 Accepted: autumn 2025

Abstract

Due to the increasing global demand for energy and growing environmental concerns, the use of renewable resources like biomass has become highly important. Sugarcane bagasse, as an agricultural byproduct, is a valuable source for sustainable energy production. This article reviews the main approaches for energy recovery from bagasse. Thermochemical methods, including pyrolysis, gasification, direct combustion, and hydrothermal liquefaction, have been evaluated. Additionally, biochemical processes like fermentation for bioethanol production and the physical-thermochemical method of briquetting have been examined. The results indicate that each method has its own specific advantages and limitations. Hydrothermal liquefaction converts bagasse into high-quality bio-oil, while briquetting increases its density and calorific value. Direct combustion is the most common method but faces challenges such as high moisture content, which can be mitigated through co-combustion. Furthermore, gasification and fermentation are efficient methods for producing gaseous and liquid fuels. This review emphasizes that sugarcane bagasse has significant potential for energy recovery, and selecting the optimal process can substantially help reduce reliance on fossil fuels and improve waste management.

Key words: Sugarcane Bagasse, Biomass Energy, Energy Recovery, Pyrolysis, Hydrothermal liquefaction

*corresponding author: parizad.sheikhi@iau.ac.ir

Cite this article as: Parizad Sheikhi, Reviewing Approaches for Energy Recovery from Sugarcane Bagasse, **Journal of Energy Conversion, 2025, 12(3), 73-95**.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/JEED.2025.3.562]