

پیش‌بینی تولید بیواتانول از ترکیبات لیگنوسلولزی در راکتور بی‌هوازی با همزن پنوماتیکی - مکانیکی توسط شبکه عصبی

سیده هدی یوسفیان^۱، رحیم ابراهیمی^۲، بهرام حسین‌زاده سامانی^۳ و علی ملکی^۳

چکیده

در این تحقیق یک هاضم بی‌هوازی با همزن پنوماتیکی جهت تخمیر ترکیبات لیگنوسلولزی کاه گندم و برنج طراحی و با هاضم با همزن مکانیکی مقایسه گردید. پیش‌تیمار فراصوت در زمان ۳۰ دقیقه، غلظت اسید ۱/۹۰۵ v/v % و بار زیست‌توده ۶% انجام گردید. سپس هیدرولیز اسیدی در زمان ۴۵ دقیقه، غلظت اسید ۲/۰۴ v/v % و دمای ۱۴۸/۴ درجه سلسیوس انجام شد. در ادامه زیست‌توده، جهت تخمیر در دو هاضم پنوماتیکی و مکانیکی ریخته شد و طی ۲۰ روز فرآیند تخمیر صورت گرفت. توالی نمونه‌برداری هر ۵ روز بود. بر اساس نتایج، هاضم پنوماتیکی توانست به میزان ۳۸/۶۶ درصد نسبت به هاضم با همزن مکانیکی، بیواتانول بیشتری تولید کند. همچنین ترکیبات H_2S ، CO و O_2 نیز در طی تخمیر اندازه‌گیری شد. در هاضم پنوماتیکی میزان تولید H_2S و O_2 نسبت به مخزن با همزن مکانیکی کمتر، اما میزان تولید CO به طور نامحسوسی بیشتر بود. همچنین توسط شبکه عصبی نیز میزان ترکیبات ایجاد شده در تخمیر طی ۵۰ روز پیش‌بینی و با نتایج واقعی مقایسه گردید. با توجه به نتایج، می‌توان به خوبی توسط شبکه عصبی روند تغییرات ترکیبات تخمیر را در هاضم پنوماتیک (۹۴%) و هاضم مکانیکی (۸۹%) پیش‌بینی نمود و تصمیم قطعی جهت تخمیر ترکیبات کاه و گندم و برنج گرفت. در نهایت با کمک سامانه هاضم پنوماتیکی می‌توان میزان ترکیبات مضر تولید شده در طی فرآیند را کنترل کرد و میزان تولید بیواتانول را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: بیواتانول، هاضم، تخمیر، پنوماتیک، همزن.

ارجاع: یوسفیان س. ه. ابراهیمی ر. حسین‌زاده سامانی ب. و ملکی ع. ۱۴۰۱. پیش‌بینی تولید بیواتانول از ترکیبات لیگنوسلولزی در راکتور بی‌هوازی با همزن پنوماتیکی-مکانیکی توسط شبکه عصبی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۵: ۳۰-۲۱. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2022.113904.592>

۱- دکتری تخصصی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: Rahim.ebrahimi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۸

مقدمه

پرکاربرد در شکست ساختار در ترکیبات لیگنوسلولزی است (Pejin *et al.*, 2012).

در ادامه و جهت استخراج اتانول از گلوکز موجود در زیست‌توده، باید مواد را برای فرآیند تخمیر آماده کرد. اجزای سلولزی مواد لیگنوسلولزی می‌توانند پس از تجزیه‌ی آنزیمی توسط میکروارگانیسم‌های تخمیر کننده مورد استفاده قرار گرفته و در شرایط مناسب، اتانول تولید نمایند (Carrillo-Nieves *et al.*, 2019).

مخلوط کردن سیالات از فرایندهای مهم در صنایع شیمیایی است. سیستم‌های اختلاط می‌تواند شامل مخلوط کردن سیال با هر کدام از فازهای دیگر یعنی مایع، جامد و گاز باشد. عملیات اختلاط معمولاً به دلیل اختلاط یک حجم از سیال، واکنش شیمیایی، انتقال حرارت، انتقال جرم و اختلاط چند فاز با هم (سوسپانسیون و تعلیق) در داخل مخازن همزن‌دار انجام می‌شود (Jahanbakhshi & Salehi, 2019).

مخازن همزن‌دار معمولاً استوانه‌ای شکل هستند که بالای آن با هوا می‌تواند ارتباط داشته باشد یا بسته باشد. انرژی لازم جهت به حرکت درآوردن همزن نیز توسط یک الکتروموتور تأمین می‌گردد (Chow *et al.*, 2020). پره‌های همزن در مخازن همزن‌دار قادرند دو نوع کلی جریان یعنی شعاعی و محوری یا ترکیبی از این دو را به وجود آورند. در نوع جریان شعاعی، سیال پس از برخورد به پره در جهت شعاع حرکت می‌کند. اما در جریان محوری حرکت در جهت محور همزن خواهد بود. پره‌هایی که در همزن‌ها بکار می‌روند سه نوع کلی دارند که ۹۵٪ کل پره‌ها را تشکیل می‌دهند و عبارتند از ملخی، پارویی و توربینی (Jahanbakhshi & Salehi, 2019). در سرعت‌های پایین همزن، سطح مایع تقریباً صاف بوده و مایع در اطراف محور همزن گردش می‌کند. با افزایش سرعت همزن برای ایجاد تلاطم، توان لازم برای به حرکت درآوردن همزن افزایش یافته و در اطراف محور همزن گرداب تشکیل می‌شود. در سرعت‌های بالاتر، در نهایت گرداب به پره همزن می‌رسد. در این حالت هوا به درون مایع کشیده شده و قسمتی از پره درون هوا می‌گردد و توان لازم کاهش می‌یابد. کشیده شدن هوا به درون مایع عموماً نامطلوب است و به‌علاوه وجود گرداب سبب بروز مشکلاتی در تغییر مقیاس آزمایشگاهی و نیمه صنعتی به مقیاس صنعتی می‌گردد. لذا سعی در پیش‌گیری از ایجاد گرداب می‌شود

اتانول یا الکل اتیلیک با فرمول شیمیایی C_2H_5OH را می‌توان به دو روش پتروشیمیایی (هیدراسیون یا به عبارتی احیای غیرمستقیم و یا احیای مستقیم گاز اتیلن) و زیستی تولید کرد. بیواتانول (اتانول زیستی) توسط تخمیر اجزای کربوهیدراتی مواد گیاهی تولید می‌شود (Toor *et al.*, 2020). روش‌های مرسوم تولید بیواتانول (سوخت‌های زیستی نسل اول) بر پایه استفاده از محصولات نشاسته‌ای مانند ذرت و گندم و محصولات قندی مانند نیشکر و چغندر قند هستند (Panahi *et al.*, 2020). با این حال، کشت محصولات زراعی جایگزین مانند سورگوم شیرین فرصت‌های جدیدی را در جهان به ویژه در مناطق گرم و خشک ایجاد می‌کند (Ofori-Boateng & Lee, 2014).

علاوه بر این، با توسعه فناوری‌های جدید علاوه بر نشاسته و محصولات قندی حاوی انرژی بالا می‌توان از زیست توده‌های چوبی یا زیست توده جنگل‌ها به عنوان مواد لیگنوسلولزی نیز استفاده کرد که به عنوان نسل دوم سوخت‌های زیستی شناخته می‌شود (Velmurugan & Muthukumar, 2011). ترکیبات لیگنوسلولزی از سلولز، همی‌سلولز، لیگنین و مقدار ناچیزی ترکیبات دیگر تشکیل شده است. سلولز، فراوان‌ترین ترکیب در میان توده‌های زیستی است که در طبیعت و مخصوصاً در دیواره‌های سلولی گیاهان یافت می‌شود (Leustean, 2009). همی‌سلولز اغلب به صورت شیمیایی در اجتماع پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها یا لیگنین‌ها حضور دارد و در مقایسه با سلولز، کریستالی و بسیار سخت است (Lin *et al.*, 2020). سلولز و همی‌سلولز به هم متصل و توسط لیگنین پوشانیده شده‌اند. پیوندهای شیمیایی بین لیگنین و همی‌سلولز و حتی سلولز یکی از موانع استفاده از مواد لیگنوسلولزی در فرآیندهای هیدرولیز و تخمیر است (Pan *et al.*, 2019).

مواد لیگنوسلولزی نسبت به حملات شیمیایی و بیولوژیکی بسیار مقاوم هستند. در واقع، عملیات پیش‌تیمار و هیدرولیز (Alvira *et al.*, 2010) جهت ایجاد تغییر در ساختار فیزیکی و شیمیایی مواد لیگنوسلولزی و به منظور بهبود بازده تبدیل آنها به قندهای قابل تخمیر صورت می‌گیرد. پیش‌تیمارهای مختلف فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی-شیمیایی از جمله پیش‌تیمارهای

طرفی با استفاده از همزن پنوماتیکی می‌توان در مصرف انرژی به طور چشم‌گیری صرفه‌جویی نمود و فرآیند اختلاط با مصرف انرژی کمتری صورت گیرد. با توجه به مطالعات صورت گرفته، هدف از انجام این تحقیق، بهبود فرآیند تولید بیواتانول با استفاده از تخمیر با همزن پنوماتیکی است که نخستین بار بدین صورت انجام خواهد شد.

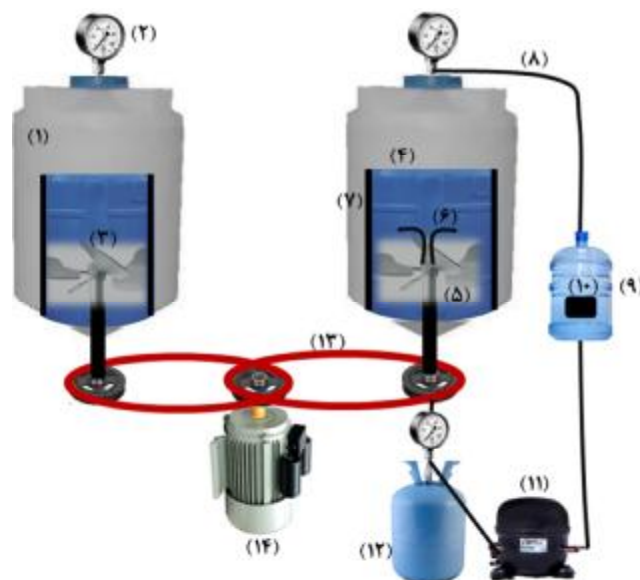
مواد و روش‌ها

در این پژوهش پسماند دو محصول گندم و برنج (کاه) تهیه شد. قبل از استفاده از مواد شیمیایی و جهت خالص‌سازی، ابتدا مواد اولیه توسط هموژنایزر آزمایشگاهی (آسان‌توس شرق، ۱۰۰۰) به قطعات ریزتر تقسیم شد و به مدت ۲۴ ساعت در آب گذاشته شد تا کاملاً خیس بخورند و مواد اضافی چسبیده به آنها راحت‌تر جدا شود. سپس برای خشک شدن، مواد در دمای ۶۰ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت در آن (Memmert, UN55) قرار گرفتند. سپس از الک با اندازه ۲۰ (۸۵۰ میکرون) عبور داده شد و در کیسه پلی‌اتیلنی در بسته در دمای محیط نگهداری شدند. مراحل تولید بیواتانول در تحقیق، در شکل ۱ نشان داده شده است.

(Niazkhani., 2018). همچنین جهت جلوگیری از اتلاف وقت و هزینه در بسیاری از آزمایشات نمی‌توان در روزهای متوالی ترکیبات را بررسی نمود اما از هوش مصنوعی می‌توان در این زمینه بهره برد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی از روش‌های مدل‌سازی با الهام از ویژگی‌های سیستم عصبی انسان است، که در حوزه‌های مختلف علوم مهندسی برای پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده و غیر خطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساختار شبکه عصبی حداقل با داشتن سه لایه شامل لایه ورودی، حداقل یک لایه مخفی و یک لایه خروجی قابل تعریف است. هر ورودی به شبکه عصبی به یک وزن ضرب شده و با یک بایاس جمع می‌گردد. از الگوریتم‌های مختلف شبکه برای آموزش الگوی موجود بین داده‌ها استفاده می‌شود و از سه قسمت آموزش، اعتبارسنجی و آزمون شبکه، مدل ساخته شده قابل ارزیابی است (Alborzi, 2001). در مجموع می‌توان از شبکه عصبی در پیش‌بینی فرآیندهای مختلف استفاده نمود.

با توجه به اهمیت بیواتانول و همچنین نحوه هم‌زدن در طی فرآیند تخمیر، نیاز است تا با روشی، مصرف انرژی و فرآیند هم‌زدن را سرعت بخشید و در عین حال در سرعت‌های بالا نیز از ایجاد گرداب جلوگیری نمود. از



شکل ۱- نمای فرآیند تخمیر توسط همزن پنوماتیک

۱- مخزن، ۲- فشارسنج، ۳- همزن مکانیکی، ۴- مخزن اصلی زیست‌توده، ۵- همزن پنو-مکانیکی، ۶- نازل روی همزن، ۷- بافل‌ها (سپرک) ۸- لوله انتقال گاز جمع‌آوری شده در مخزن، ۹- مخزن جمع‌آوری گاز، ۱۰- سیلیکازل، ۱۱- کمپرسور، ۱۲- کپسول، ۱۳- پولی و تسمه و ۱۴- الکتروموتور)

پیش‌تیمار نمونه‌ها با فراصوت

در این بخش، ۵ گرم زیست‌توده آسیاب شده با ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر در داخل قوطی‌های یورین ریخته و در محفظه آبی آلتراسوند (Digital Ultrasonic Cleaner,) CD-4820 (2500 cc) در زمان، دما و غلظت‌های اسید مختلف و با فرکانس ۳۵ kHz قرار گرفت. بعد از پیش‌تیمار فراصوت، جهت جداسازی محلول از زیست‌توده توسط کاغذ صافی whatman، محلول جداسازی شد و سپس و جهت خنثی کردن اثر اسید سولفوریک، زیست‌توده با آب مقطر و توسط قیف خلأ بوخنر شست و شو داده شد (Niju *et al.*, 2020).

هیدرولیز

پیش‌تیمار فراصوت در زمان ۳۰ دقیقه، غلظت اسید ۱/۹۰۵ v/v % و بار زیست‌توده ۶% انجام شد. بعد از پیش‌تیمار فراصوت، میزان ۳۰ گرم زیست‌توده با ۶۱۶ میلی‌لیتر آب مقطر و ۱۱/۷۳ میلی‌لیتر اسید سولفوریک پیش‌تیمار و با آب مقطر شستشو داده شد و سپس بخش جامد و محلول جدا گردید. بخش جامد در آون با دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفت تا رسیدن به وزن ثابت خشک شود. بعد از فرآیند پیش‌تیمار، میزان ۱۰ گرم زیست‌توده به همراه ۸۰ میلی‌لیتر آب مقطر در داخل قوطی‌های یورین ۷۰ میلی‌لیتری عایق در مقابل حرارت ریخته شد تا عملیات هیدرولیز انجام گردد.

تخمیر زیست‌توده با همزن پنوماتیکی-مکانیکی

جهت بررسی فرآیند تخمیر از دو مخزن فایبرگلاس جهت مقایسه همزن مکانیکی و پنوماتیکی بر ظرفیت تولید بیواتانول استفاده شد. مخزن فایبرگلاس با همزن پنوماتیکی دارای حجم ۲۲۰ لیتر، ضخامت ۰/۰۱ متر، قطر ۰/۵۷ متر و ارتفاع ۰/۹ متر بود. در داخل آن از یک مخزن با حجم ۲۰ لیتر که شامل بافل‌هایی (سپرک) روی دیواره درونی آن بود، استفاده شد و انتهای مخازن همزن‌ها قرار داشتند. نمای مخازن و اتصالات همزن‌ها در شکل (۱) آورده شده است. همزن پنوماتیکی پارویی ساده شامل ۴ پره به طول ۱۲ سانتی‌متر متصل بر روی یک محور بوده و روی آن نازل‌هایی متقارن به طول تقریبی ۲ سانتی‌متر همراه با سوپاپ یک‌طرفه جوش خورده است. انتهای هر مخزن و از دیواره بیرونی، یک محور همراه با تسمه و پولی

به موتور الکتریکی متصل شد و با کمک تثبیت‌کننده دور آن قابل تنظیم بود. پس از مایع‌سازی، ۱۰ کیلوگرم زیست‌توده در مخزن همزن‌کننده ریخته شد و ۱۰ گرم مخمر *Saccharomyces cerevisiae* (۵ گرم به ازای هر لیتر) (Niju *et al.*, 2020) اضافه شد. در داخل مخزن اولیه و تا بالای مخزن آب ریخته شد و المنت‌های گرمایشی جهت گرم کردن آب داخل مخزن گرم‌کننده قرار گرفت. میزان pH هر دو مخزن توسط pH متر (3510, JENWAY, England) اندازه‌گیری شد که میانگین آن ۶/۸۳ بدست آمد. میزان دمای آب داخل مخزن گرم‌کننده هر روز توسط دماسنج (Lutron, TM-939) بررسی شد. میانگین دمای آب مخزن گرم‌کننده برابر با ۳۷ درجه سلسیوس نگهداشته شد. زیست‌توده، روزانه به مدت ۱۰ دقیقه در طی ۲۰ روز به صورت بی‌هوازی و پنوماتیک هم زده شد. گاز جمع‌آوری شده روی سطح زیست‌توده در داخل مخزن با گذشت زمان توسط لوله و در داخل یک مخزن ثانویه جمع‌آوری گردید. همچنین در این بخش از کیسه‌های سیلیکاژل ساشه‌ای جهت کاهش رطوبت در گاز برگشتی استفاده شد. سپس توسط کمپرسور و با تنظیم فشارسنج، گاز در زمان‌های مشخص به داخل مخزن و توسط نازل‌ها رانده شد. همچنین جهت مقایسه همزن پنوماتیکی، یک مخزن با همزن مکانیکی نیز طراحی گردید. تمامی مشخصات مخزن مکانیکی مانند مخزن قبل است و فقط در این مخزن از همزن مکانیکی جهت همزدن زیست‌توده استفاده شد. در نهایت در فواصل زمانی ۵ روزه توسط شیر خروجی تعبیه شده در انتهای مخزن از داخل راکتور نمونه‌برداری شد و برای مرحله تقطیر در داخل شیشه‌های در بسته نگهداری گردید. اندازه‌گیری ترکیبات بیواتانول بر اساس ppm و %v/v با استفاده از گازسنج BW (Gas Alert Max XT II, Canada) انجام گردید. بعد از مراحل تقطیر در چگالنده (IKA RV 10 digital V, Germany) در دمای ۷۸/۵ درجه سلسیوس، مقدار بیواتانول توسط یک سوانگار گازی (Gas Chromatography) با تزریق ۵ میکرولیتر از محلول خروجی از راکتور (بیواتانول) به دستگاه و با مشخصات دستگاهی ثابت، مورد بررسی قرار گرفت.

به طور خلاصه، بعد از انجام هیدرولیز با سولفوریک اسید ۲/۰۴%، زیست‌توده به مدت ۴۵ دقیقه و در دمای ۱۴۸/۴ درجه سلسیوس قرار گرفت. سپس عملیات تخمیر روی

جدول ۱- نتایج پیش‌بینی شبکه عصبی در تولید H₂S در دو

هاضم مختلف		
نوع هاضم	بهترین شبکه	آموزش
H ₂ S-PMD	لایه	۳
	اجرا	۱
	تکرار	۱۹۸
	کمترین مربعات خطا	$3/69779 \times 10^{-22}$
H ₂ S-MD	مربعات خطای نهایی	$7/19014 \times 10^{-22}$
	r	۰/۹۲
	لایه	۴
	اجرا	۱
H ₂ S-MD	تکرار	۲۰۰
	کمترین مربعات خطا	$1/6563 \times 10^{-22}$
	مربعات خطای نهایی	$1/6563 \times 10^{-22}$
	r	۰/۹۷

با توجه به نتایج شبکه عصبی (شکل ۳-ب)، بهترین شبکه برای بررسی H₂S در هاضم پنوماتیک با سه لایه و تکرار ۱۹۸ رخ داد. در این شبکه میزان r بالا و میانگین مربعات خطای پایین نشان دهنده این است که پراکندگی داده‌ها کم است. نتایج پیش‌بینی شبکه عصبی با نمودار قرمز رنگ در شکل ۳-ج از روز اول تا ۵ام تخمیر در هاضم پنوماتیک ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در روز ۵ام تخمیر در هاضم بی‌هوازی افزایش H₂S رخ داده و سپس به مرور زمان این روند کاهش یافته است. شبکه عصبی ایجاد شده میزان H₂S تولید شده در راکتور بی‌هوازی را در روز ۲۰ام تخمیر در پایین‌ترین میزان خود پیش‌بینی کرده است و با افزایش تخمیر، میزان H₂S افزایش یافته است. همچنین میزان H₂S در راکتور مکانیکی MD در روزهای ۵، ۱۰ و ۱۵ام افزایش داشته است و تا روز ۲۰ام نیز کمی روند نزولی به خود گرفته است. بهترین شبکه عصبی در روز ۱۵ام تخمیر، کاهش H₂S را نشان داده و میزان این گاز تا روز ۵ام تخمیر نیز روند صعودی را به خود گرفته است. نتایج شبکه عصبی نشان می‌دهد که با افزایش زمان تخمیر میزان H₂S افزایش می‌یابد که این به نوبه خود یک ضرر برای فرآیند تخمیر است. به نظر می‌رسد شبکه عصبی بهترین زمان تخمیر را در روز ۱۵ام تخمیر در راکتور MD و روز ۲۵ام در راکتور PMD تخمین زده است. می‌توان گفت که توسعه همزن پنوماتیکی در راستای حذف H₂S موفق

زیست‌توده داخل هر دو مخزن شروع گردید. جهت مقایسه بین عملکرد دو مخزن پنوماتیکی (Pneu-Mechanical Digester, PMD) و مکانیکی (Mechanical Digester, MD) میزان بیواتانول، H₂S، CO و O₂ در طول دوره ۲۰ روزه اندازه‌گیری شد. سپس توسط شبکه عصبی میزان ترکیبات تولید شده تا ۵۰ روز تخمیر پیش‌بینی گردید تا بررسی شود که افزایش مدت زمان تخمیر چه تأثیری بر ترکیبات تخمیر دارد.

ساختار شبکه عصبی یکی از عوامل مهمی است که می‌تواند عملکرد یادگیری شبکه را تحت تأثیر قرار دهد. پرسپترون‌های چند لایه به عنوان شبکه رو به جلو که توانایی یادگیری رابطه بین ورودی و خروجی را دارند، شناخته می‌شوند، به طوری که به صورت یک پیش‌بینی‌کننده قوی شناخته شده‌اند. برای مدل‌سازی ترکیبات تولیدی در طی فرآیند تخمیر، مقدار نوع هاضم و روز تخمیر به عنوان ورودی و ترکیبات گازی و بیواتانول نیز به عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شد. در این مطالعه، تعداد ۲۱۰ داده جهت آموزش (۷۰ درصد از داده‌ها برای آموزش)، ۴۵ داده برای آزمون شبکه (۱۵ درصد از داده‌ها برای آزمون شبکه) و تعداد ۴۵ داده برای اعتبارسنجی مدل (۱۵ درصد برای اعتبارسنجی شبکه) اختصاص داده شد. همچنین از شبکه عصبی با ۴ لایه مخفی و به ترتیب ۲، ۳، ۴ و ۵ نرون با هدف پیدا کردن مدلی که بتواند بهترین پیش‌بینی ترکیبات را داشته باشد، استفاده شد. برای لایه‌های پنهان توابع انتقال تانژانت هایپربولیک و برای لایه خروجی تابع انتقال خطی برای برآورد خروجی در نرم‌افزار NeuroSolutions 7 استفاده شد.

نتایج و بحث

پیش‌بینی ترکیبات حاصل از تخمیر توسط شبکه عصبی

بر اساس نتایج و با توجه به شکل ۳-الف و روند نمودار آبی رنگ، میزان H₂S تولیدی در مخزن PMD در روز ۲۰ام تخمیر به ۸ گرم بر لیتر کاهش پیدا کرد درحالی که در مخزن MD در انتهای فرآیند تخمیر، این مقدار به میزان ۱۵ گرم بر لیتر رسید. نتایج نشان داد که میزان H₂S در PMD نسبت به MD در انتهای فرآیند تخمیر به میزان ۴۶٪ کمتر بود.

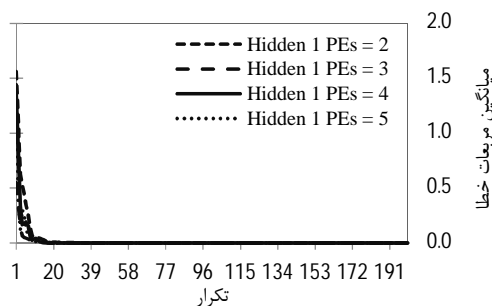
میزان CO تولید شده تا روز ۵۰ تخمیر را به مقدار ۱۸۰ گرم بر لیتر پیش‌بینی کرد (شکل ۴-ج).

جدول ۲- نتایج پیش‌بینی شبکه عصبی جهت تولید CO در دو هاضم مختلف

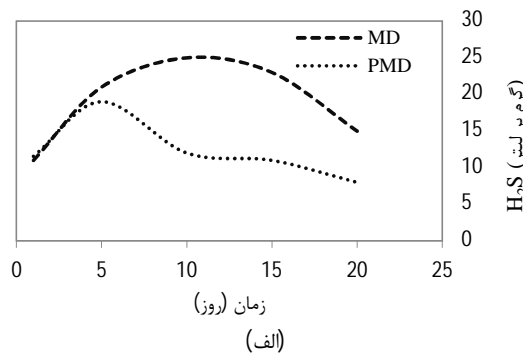
نوع هاضم	بهترین شبکه	آموزش
CO-PMD	لایه	۵
	اجرا	۱
	تکرار	۱۹۹
	کمترین مربعات خطا	$4/1085 \times 10^{-33}$
CO-MD	لایه	۳
	اجرا	۱
	تکرار	۱۹۲
	کمترین مربعات خطا	$2/10568 \times 10^{-33}$
	مربعات خطای نهایی	$2/87606 \times 10^{-33}$
	r	۰/۹۳
	r	۰/۹۶

بوده و توانسته است میزان آن را کاهش دهد، زیرا H₂S در آب و با جابجایی یا به عبارتی گردش گازهای حاصل از فرآیند در زیست‌توده حل گردیده است (Mahmoodi-Eshkaftaki, & Ebrahimi., 2019; Van der Zee *et al.*, 2007).

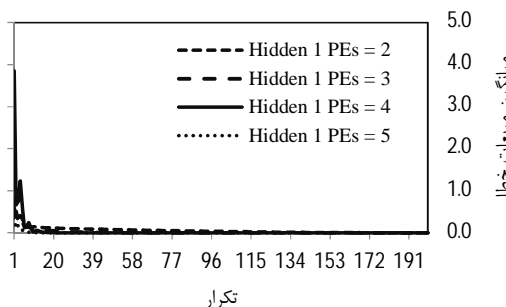
نتایج اندازه‌گیری CO در راکتور بی‌هوازی MD و PMD در شکل ۴-الف نشان داده شده است. میزان CO تولیدی در مخزن PMD از MD بیشتر است و دلیل آن افزایش گردش گازهای موجود در مخزن است. همچنین نتایج پیش‌بینی با شبکه عصبی طی ۵۰ روز تخمیر در دو راکتور در شکل ۴-ب و ۴-د نشان داده شده است. شبکه عصبی جهت پیش‌بینی تولید CO در لایه ۵ و ۳ به ترتیب برای دو هاضم پنوماتیک و مکانیکی با r بالا و MSE پایین توانسته است، پیش‌بینی را انجام دهد. بر اساس نتایج شبکه عصبی، کمترین میزان CO تولید شده در روز ۱۵ تخمیر رخ داده و همانطور که پیداست میزان تولید CO تا روز ۵۰ تخمیر به میزان ۴۶۳/۹۲ گرم بر لیتر افزایش داشته است (شکل ۴-ج). همچنین میزان CO تولید شده در راکتور MD نیز در روز ۱۵ تخمیر در کمترین میزان خود یعنی ۱۰۰ گرم بر لیتر قرار داشت. شبکه عصبی



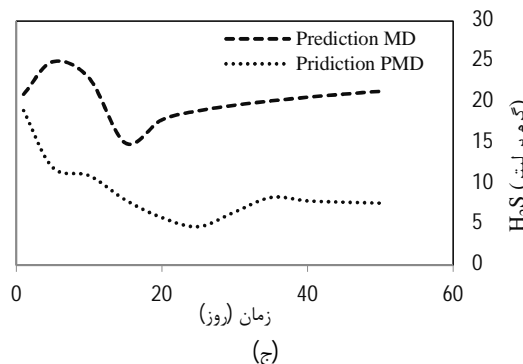
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

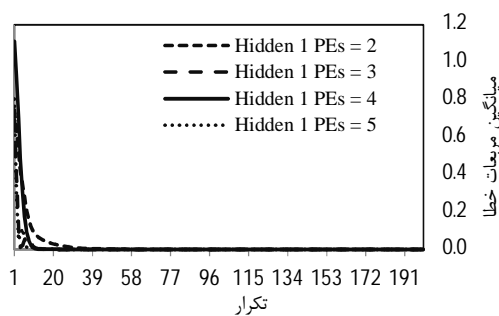
شکل ۳- مقایسه دو هاضم بی‌هوازی پنوماتیکی و مکانیکی در تولید H₂S (الف) هاضم پنوماتیک و مکانیکی، (ب) میانگین مربعات خطا در هاضم پنوماتیک، (ج) نتیجه پیش‌بینی شبکه عصبی در دو هاضم پنوماتیک و مکانیکی و (د) میانگین مربعات خطا در هاضم مکانیکی

محسوب می‌شود. مخزن PMD طراحی شده موجب کاهش مقادیر H_2S و O_2 گردید و مقدار CO را نسبت به MD افزایش داد اما می‌توان با تنظیم شرایط ورودی تخمیر مانند بهینه‌سازی هیدرولیز، پیش‌تیمار و ... میزان CO را نیز بهبود بخشید تا بتوان با کمترین هزینه، فرایند تولید بیواتانول را بهبود داد.

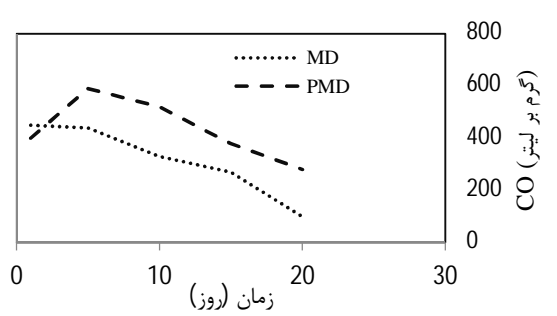
جدول ۳- نتایج پیش‌بینی شبکه عصبی جهت تولید O_2 در دو هاضم مختلف

نوع هاضم	بهترین شبکه	آموزش
O_2 -PMD	لایه	۴
	اجرا	۱
	تکرار	۲۰۰
	کمترین مربعات خطا	$9/32471 \times 10^{-22}$
	مربعات خطای نهایی	$9/32471 \times 10^{-22}$
	r	۰/۸۹
O_2 -MD	لایه	۵
	اجرا	۱
	تکرار	۲۰۰
	کمترین مربعات خطا	$2/10568 \times 10^{-22}$
	مربعات خطای نهایی	$1/25314 \times 10^{-22}$
	r	۰/۹۱

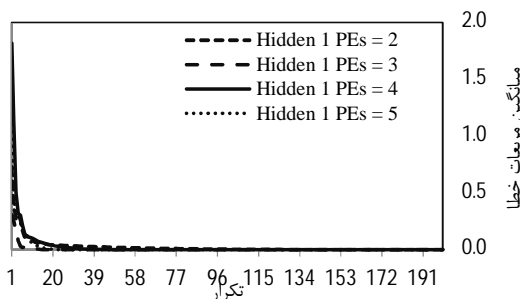
نتایج اندازه‌گیری مقادیر O_2 در هاضم پنوماتیک و مکانیکی در شکل ۵-الف نشان داده شده است. با توجه به نتایج، میزان O_2 تولیدی در PMD به میزان ۷۶٪ نسبت به MD کمتر بود. همچنین مقادیر پیش‌بینی شبکه عصبی تا روز ۵۰ تخمیر در شکل ۵-ج نیز نشان داده شده است. بهترین شبکه جهت پیش‌بینی مقادیر تولید O_2 در لایه ۴ و ۵ با r بالا و میانگین مربعات خطا پایین توانایی پیش‌بینی تولید O_2 تا ۵۰ روز تخمیر را داشت (جدول ۳ و شکل ۵-ب و ۵-د). بر اساس نتایج در شکل ۵-ج، خط قرمز رنگ مقادیر تولید اکسیژن در طول روند تخمیر را نشان می‌دهد که تا روز ۲۰ و ۲۵ تخمیر روند نزولی و بعد از روز ۲۵ تخمیر به تدریج روند صعودی به خود گرفته است. همچنین در هاضم مکانیکی نیز روند کاهش و افزایش اتفاق افتاده است با این تفاوت که میزان کاهش اکسیژن در هاضم پنوماتیک نسبت به مکانیکی بیشتر است. اگر میزان O_2 در یک هاضم بیواتانول بالا باشد موجب افزایش میزان CO_2 و H_2S شده و افزایش این ترکیبات موجب کاهش بیواتانول تولیدی می‌گردد (Cacua *et al.*, 2011; Lin & Chien., 2008). با توجه به نتایج می‌توان گفت تولید و افزایش CO و کاهش مقادیر H_2S و O_2 هرکدام یک مزیت و یک عیب برای تولید بیواتانول



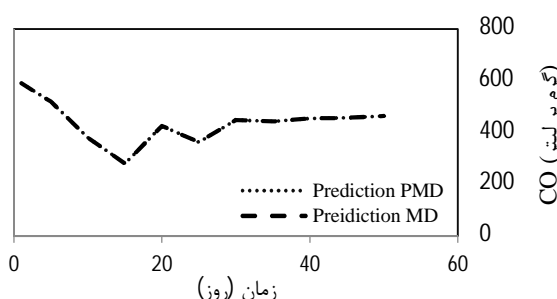
(ب)



(الف)

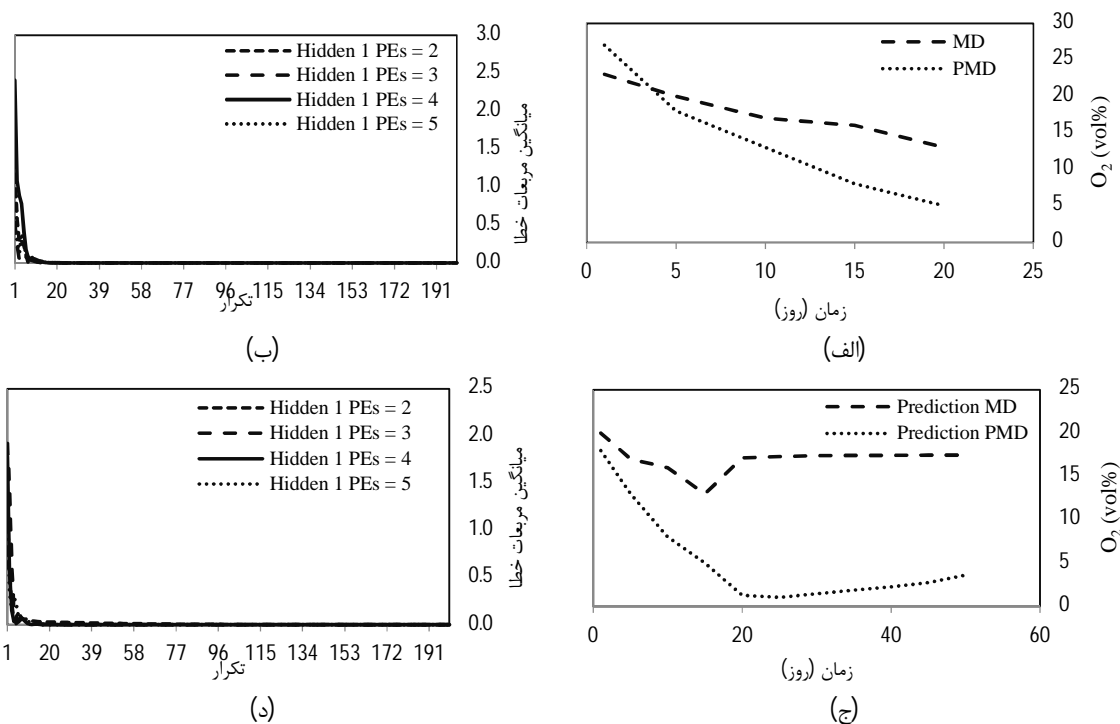


(د)



(ج)

شکل ۴- مقایسه دو هاضم بی‌هوازی پنوماتیک و مکانیکی در تولید CO در (الف) هاضم پنوماتیک و مکانیکی، (ب) میانگین مربعات خطا در هاضم پنوماتیک، (ج) نتیجه پیش‌بینی شبکه عصبی در دو هاضم پنوماتیک و مکانیکی و (د) میانگین مربعات خطا در هاضم مکانیکی



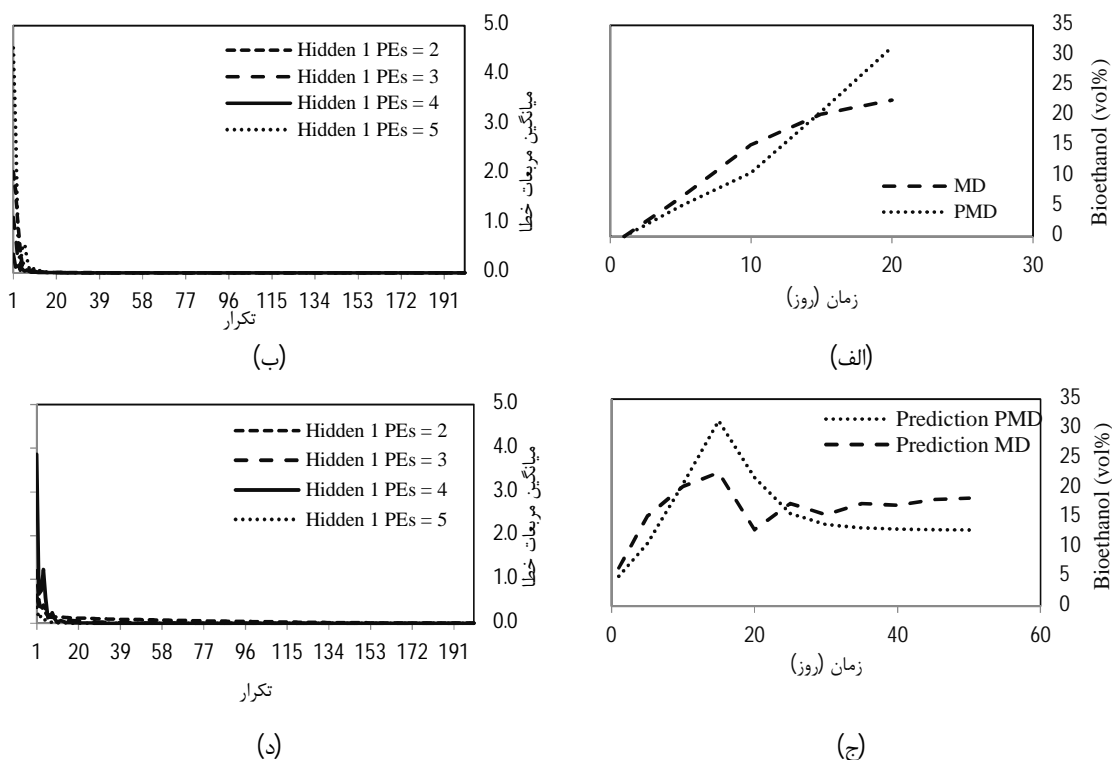
شکل ۵- مقایسه دو هضم بی‌هوازی پنومکانیکی و مکانیکی در تولید O₂ در (الف) هاضم پنوماتیک و مکانیکی، (ب) میانگین مربعات خطا در هاضم پنوماتیک، (ج) نتیجه پیش‌بینی شبکه عصبی در دو هاضم پنوماتیک و مکانیکی و (د) میانگین مربعات خطا در هاضم مکانیکی

و هزینه می‌توان تخمیر را تا روز ۲۰ ادامه داد و بعد از این روز بیواتانول تولید نخواهد شد. همچنین بر اساس نتایج شبکه عصبی (شکل ۶-ج)، میزان تولید بیواتانول در هاضم MD تا روز ۱۵ و ۲۰ در بالاترین میزان خود و سپس تا روز ۵۰ تخمیر روند ابتدا نزولی و سپس صعودی است.

جدول ۴- نتایج پیش‌بینی شبکه عصبی جهت تولید بیواتانول در دو هاضم مختلف

نوع هاضم	بهترین شبکه	آموزش
PMD-بیواتانول	لایه	۴
	اجرا	۱
	تکرار	۱۹۹
	کمترین مربعات خطا	$3/13285 \times 10^{-22}$
	مربعات خطای نهایی	$1/04771 \times 10^{-21}$
	r	۰/۹۴
MD-بیواتانول	لایه	۳
	اجرا	۱
	تکرار	۱۹۲
	کمترین مربعات خطا	$2/10568 \times 10^{-22}$
	مربعات خطای نهایی	$4/57087 \times 10^{-22}$
	r	۰/۸۹

نتایج تخمیر در هاضم پنوماتیکی و مکانیکی در شکل ۶- الف نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش مدت زمان تخمیر، میزان بیواتانول تولیدی تا روز ۱۵ به طور محسوس سپس به طور نامحسوس افزایش یافته است. همچنین میزان تولید بیواتانول در دو مخزن PMD و MD متفاوت است. نتایج نشان داد که در مخزن PMD میزان بیواتانول تولیدی، $38/66$ vol% نسبت به MD بیشتر بود. این نتایج پیش‌بینی توسط شبکه عصبی (شکل ۶-ج) نیز در ادامه آورده شده است. بهترین شبکه ایجاد شده جهت پیش‌بینی تولید بیواتانول در دو هاضم PMD و MD در جدول ۴ نشان داده شده است. بهترین شبکه در پیش‌بینی بیواتانول در هاضم PMD در لایه ۴ و برای هاضم MD در لایه ۳ با r بالا و میانگین مربعات خطای پایین ایجاد شده است. بر اساس نتایج، شبکه عصبی توانسته است روند مناسب و مشابه روند تخمیر واقعی را پیش‌بینی کند. همچنین بر اساس نتایج تخمین توسط شبکه عصبی (شکل ۶-ج) می‌توان گفت تا روز ۲۰ تخمیر بیشترین مقادیر بیواتانول تولید می‌شود و سپس از روز ۲۰ به بعد روند تولید بیواتانول حالت نزولی به خود می‌گیرد. این نتایج بدین معنی است که جهت کاهش وقت



شکل ۶- مقایسه دو هضم بی‌هوازی پنومکانیکی و مکانیکی در تولید بیواتانول در الف) هاضم پنوماتیک و مکانیکی، ب) میانگین مربعات خطا در هاضم پنوماتیک، ج) نتیجه پیش‌بینی شبکه عصبی در دو هاضم پنوماتیک و مکانیکی و د) میانگین مربعات خطا در هاضم مکانیکی

است. اما میزان CO تولیدی در هاضم پنوماتیکی به طور نامحسوس نسبت به همزن هاضم مکانیکی افزایش داشت که به نظر می‌رسد می‌توان با بهینه‌سازی شرایط هاضم پنومکانیکی میزان CO را کم و کنترل نمود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که هاضم طراحی شده با همزن پنوماتیکی می‌تواند به خوبی جهت تولید بیواتانول به صورت بی‌هوازی استفاده شود و می‌توان توسط آن به راحتی و با هزینه خیلی پایین ترکیبات مضر فرآیند تخمیر و تولید بیواتانول را کنترل نمود.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (Iran National Science Foundation) با کد طرح ۹۹۰۲۳۹۸۴ انجام شده است. همچنین این تحقیق برگرفته از رساله دکتری مصوب دانشگاه شهرکرد است.

نتیجه‌گیری

جهت استخراج اتانول از گلوکز موجود در زیست‌توده، باید مواد را برای فرآیند تخمیر آماده‌سازی کرد. اجزاء سلولزی مواد لیگنوسلولزی می‌توانند پس از تجزیه‌ی آنزیمی توسط میکروارگانسیم‌های تخمیر کننده مورد استفاده قرار گرفته و در شرایط مناسب، اتانول تولید نمایند. بدین منظور در این تحقیق، هاضم بی‌هوازی با همزن پنوماتیکی جدیدی جهت تخمیر بی‌هوازی ترکیبات لیگنوسلولزی طراحی شد و عملکرد آن با هاضم و با همزن مکانیکی معمول مقایسه گردید. بعد از سم‌زدایی محصولات حاصل از پیش‌تیمار و هیدرولیز، فرآیند تخمیر در هاضم‌ها طی ۲۰ روز انجام شد و هر ۵ روز از هاضم‌ها نمونه‌برداری مایع و گاز گردید. عملکرد دو هاضم توسط مقادیر H_2S ، CO، O_2 و میزان تولید بیواتانول بررسی شد. نتایج پیش‌بینی با شبکه عصبی در محصولات تخمیر نشان داد که هاضم پنوماتیکی می‌تواند میزان تولید H_2S و O_2 را کاهش دهد و بدین ترتیب می‌توان گفت میزان ترکیبات مضر در طی فرآیند تولید بیواتانول نسبت به همزن مکانیکی کاهش یافته

- Process Equipment. *Aria Danesh Publications*, 250. (In Persian)
- Niju, S., Nishanthini, T., & Balajii, M. (2020). Alkaline hydrogen peroxide-pretreated sugarcane tops for bioethanol production—a process optimization study. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 10(1): 149-165.
- Ofori-Boateng, C., & Lee, K. T. (2014). Ultrasonic-assisted simultaneous saccharification and fermentation of pretreated oil palm fronds for sustainable bioethanol production. *Fuel*, 119: 285-291.
- Pan, L., He, M., Wu, B., Wang, Y., Hu, G., & Ma, K. (2019). Simultaneous concentration and detoxification of lignocellulosic hydrolysates by novel membrane filtration system for bioethanol production. *Journal of Cleaner Production*, 227: 1185-1194.
- Panahi, H. K. S., Dehghani, M., Aghbashlo, M., Karimi, K., & Tabatabaei, M. (2020). Conversion of residues from agro-food industry into bioethanol in Iran: An undervalued biofuel additive to phase out MTBE in gasoline. *Renewable Energy*, 145: 699-710.
- Pejin, D. J., Mojović, L. V., Pejin, J. D., Grujić, O. S., Markov, S. L., Nikolić, S. B., & Marković, M. N. (2012). Increase in bioethanol production yield from triticale by simultaneous saccharification and fermentation with application of ultrasound. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 87(2): 170-176.
- Toor, M., Kumar, S. S., Malyan, S. K., Bishnoi, N. R., Mathimani, T., Rajendran, K., & Pugazhendhi, A. (2020). An overview on bioethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Chemosphere*, 242: 125080.
- Van der Zee, F. P., Villaverde, S., Garcia, P. A., & Polanco, F. F. (2007). Sulfide removal by moderate oxygenation of anaerobic sludge environments. *Bioresour. Technol.*, 98(3): 518-524.
- Velmurugan, R., & Muthukumar, K. (2011). Utilization of sugarcane bagasse for bioethanol production: sono-assisted acid hydrolysis approach. *Bioresour. Technol.*, 102(14): 7119-7123.
- Alborzi, M. (2001). *Introduction to Neural Networks*. Translation. By Jackson, R. and Bill, t. *Sharif University Press*, (In Persian)
- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., & Negro, M. J. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. *Bioresour. Technol.*, 101(13): 4851-4861.
- Cacua, K., Amell, A., & Olmos, L. (2011). A comparative study of the com-combustion properties of normal bio-bustion biogas gas gas-air mixture and oxygen oxygen-enriched biogas biogas-air. *Ingeniería e investigación*, 31(1): 233-241.
- Carrillo-Nieves, D., Alanís, M. J. R., de la Cruz Quiroz, R., Ruiz, H. A., Iqbal, H. M., & Parra-Saldívar, R. (2019). Current status and future trends of bioethanol production from agro-industrial wastes in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102: 63-74.
- Chow, W. L., Chong, S., Lim, J. W., Chan, Y. J., Chong, M. F., Tiong, T. J., Chin, J.K. & Pan, G. T. (2020). Anaerobic Co-Digestion of Wastewater Sludge: A Review of Potential Co-Substrates and Operating Factors for Improved Methane Yield. *Processes*, 8(1): 39.
- Jahanbakhshi, A., & Salehi, R. (2019). Processing watermelon waste using *Saccharomyces cerevisiae* yeast and the fermentation method for bioethanol production. *Journal of Food Process Engineering*, 42(7): e13283.
- Leustean, I. (2009). Bioethanol from lignocellulosic materials. *Journal of Agroalim. Process. Technol.*, 15: 94-101.
- Lin, C. C., & Chien, K. S. (2008). Mass-transfer performance of rotating packed beds equipped with blade packings in VOCs absorption into water. *Separation and purification technology*, 63(1): 138-144.
- Lin, S. P., Kuo, T. C., Wang, H. T., Ting, Y., Hsieh, C. W., Chen, Y. K., Hsu, H.Y. & Cheng, K. C. (2020). Enhanced bioethanol production using atmospheric cold plasma-assisted detoxification of sugarcane bagasse hydrolysate. *Bioresour. Technol.*, 313: 123704.
- Mahmoodi-Eshkaftaki, M., & Ebrahimi, R. (2019). Assess a new strategy and develop a new mixer to improve anaerobic microbial activities and clean biogas production. *Journal of Cleaner Production*, 206: 797-807.
- Niazkhani, S. (2018). Download the book Introduction to Oil, Gas and Petrochemical