



مکابو

فصلنامه علمی - تخصصی

انجمن علمی - دانشجویی مهندسی مکانیک بیوسیستم

صاحب امتیاز: انجمن علمی - دانشجویی مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تربیت

مدرس (معاونت فرهنگی و اجتماعی)

مدیر مسئول و سردبیر: هانیه صمدی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تربیت مدرس

مدیر اجرایی و دبیر تحریریه: بهنام حسینقلی لو

دانش آموخته ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تربیت مدرس

هیئت تحریریه: دکتر شیوا گرجیان، مسعود دهقانی، فرشاد داودی، حافظ جعفری، محمدحسین

رحمانی، آرمین فتاح پور، مهدی نوجوان، هانیه صمدی

طراح جلد: پدram قیاسی

طراح و صفحه آرا: پدram قیاسی

ویراستار: هانیه صمدی

سال دوم. شماره ۵. زمستان ۱۳۹۶

نشانی پستی: کیلومتر ۱۷ اتوبان تهران - کرج، بلوار پژوهش، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت

مدرس، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، طبقه ی اول، اتاق ۱۳۱ الف

پست الکترونیکی: mechabio95@gmail.com

آدرس وبلاگ: bea-tmu.blogfa.com

قیمت: ۵۰۰۰ تومان

این نشریه دارای شماره مجوز ۳۴۸۸۴ در تاریخ ۱۱/۱۰/۱۳۹۵ از معاونت فرهنگی و اجتماعی دانشگاه

تربیت مدرس است.

۱ سخن سردبیر

۲ دفع شورابه های حاصل از سامانه های نمک زدایی

۵ گیاه استویا

۷ پنل های خورشیدی نیمه شفاف

۹ ثبت اختراع

بهبود تولید سوخت های زیستی با استفاده از

۱۰ بیوتکنولوژی

۱۲ دانشگاه نسل سوم

۱۴ ترموالکتریک

۱۷ مقاله







ای همت هستی ز تو پیدا شده خاک ضعیف از تو توانا شده

زیرتین علمت کاینات مابو قائم چو تو قائم بذات

هستی تو صورت پیوندنی تو بکس و کس تو مانندنی

آنچه تغییر نپذیرد توئی وانگه نمر دست و نمیرد توئی

ماهه فانی و بقا بس تراست ملک تعالی و تقدس تراست

### تظامی کنجوی

داشتن روحیه شکرگزاری از نشانه‌های سلامت روح و روان آدمی است. همچنین شکرگزاری، نشانه دور بودن آدمی از بیماری‌هایی چون غفلت از نعمت‌ها، غرور، بخل و کفران نعمت است. افزون بر به جای آوردن شکر و سپاس خدا، قدردانی از بندگان او نیز نشان‌دهنده سلامت روح و بهداشت روان است. آن‌که روحی سالم دارد، خدمت دیگران در حق خود را انکار نمی‌کند و از آنها به شایستگی و در حد توان قدردانی می‌کند. توکل بر خدا، تردیدها و دلهره‌ها را از میان می‌برد و قلب آدمی را سرشار از آرامش می‌کند و روح را با سلامتی همراه می‌سازد.

با استناد بر این سخن، با توکل به خدا در انجام امور نشریه‌ی دانشجویی مکابو، بر خود وظیفه می‌دانم از دوستان عزیزم و دانشجویان خبره‌ی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، که یاری‌رساننده به ما در چاپ این نشریه می‌باشند، نهایت سپاس و قدردانی را انجام دهم.





## روش پایدار دفع شورابه‌های حاصل از سامانه-

## های نمک‌زدایی

در حال حاضر، جمعیت جهان، با روند فزاینده‌ی رشد خود و محدودیت شدید منابع آب شیرین با معضلات و مشکلات جدی مواجه است. بیش از 1 میلیارد نفر از جمعیت جهان به آب پاکیزه دسترسی ندارند و به طور تقریبی 2/3 میلیارد نفر (41٪ جمعیت جهان) در مناطقی زندگی می‌کنند که با کمبود آب مواجه هستند. در حال حاضر، نمک‌زدایی از منابع آب شور یک منبع مهم برای تولید آب شیرین در بسیاری از کشورهای جهان می‌باشد. لذا، بسیاری از کشورها از جمله کشورهای حوزه‌ی خلیج فارس و کشورهای حوزه‌ی مدیترانه نظیر استرالیا و آمریکا، آب شیرین مورد نیاز خود را از طریق نمک‌زدایی از آب دریاها فراهم می‌کنند.

بر اساس نوع فرآیند، سامانه‌های نمک‌زدایی به دو دسته‌ی حرارتی و غشایی تقسیم می‌شوند. در نوع اول، در طی فرآیند نمک‌زدایی تغییر فاز رخ می‌دهد (تبخیر یا انجماد). سامانه‌هایی که از فرآیندهای مذکور استفاده می‌کنند شامل تبخیر ناگهانی چندمرحله‌ای (MSF)، جوشش چندآثره (MEB)، فشردن بخار (VC)، تقطیر خورشیدی و انجماد می‌باشند. سامانه‌های نوع دوم تک‌فاز هستند. بدین معنی که تغییر فاز در آن‌ها اتفاق نمی‌افتد و استخراج نمک در حالی اتفاق می‌افتد که محلول در فاز مایع باقی می‌ماند. این سامانه‌ها شامل اسمز معکوس (RO) و الکترودیالیز (ED) می‌باشند. یک جنبه‌ی مشترک از تمامی فرآیندهای نمک‌زدایی شامل غشایی و حرارتی، تولید پساب یا همان شورابه است. شورابه یا پساب خروجی از سامانه‌های نمک‌زدایی، بسیار گرم‌تر (دمای بالای 30°C) و میزان املاح موجود در آن نیز بسیار بالاتر از آب دریاست. میزان تولید شورابه به نوع فرآیند نمک‌زدایی و میزان شوری آب ورودی بستگی دارد. لذا، دفع پساب گرم و به شدت شور سامانه‌های نمک‌زدایی

یکی از مشکلات اساسی بوده که منجر به پیامدهای زیستی- محیطی نظیر شور شدن نواحی خشکی و دریایی اطراف این سامانه‌ها و انقراض بسیاری از گونه‌ها و به هم خوردن توازن طبیعی این زیست‌بوم‌ها و در نهایت مشکلات گسترده در محیط زیست می‌گردد. حتی در بسیاری موارد (مانند آنچه در خلیج فارس رخ می‌دهد)، میزان و غلظت این مواد و املاح آنچنان زیاد است (TDS: 35000-60000ppm) که منجر به سمی شدن شورابه‌ها می‌گردد. به همین دلیل ترکیب سامانه‌های نمک‌زدایی و سامانه‌های تولید نمک به منظور جلوگیری از ورود بلافاصله‌ی پساب‌ها به محیط زیست، یک راه‌حل مطلوب خواهد بود.

علاوه بر این، همچنین رسوبات تبخیری در طول زمان تحت تأثیر تغلیظ حاصل از تابش خورشید از شورابه‌های سطحی و یا نزدیک سطحی ایجاد می‌شوند. در یک آب و هوای خشک و یک محیط هیدرولوژیکی مناسب حجم‌های بسیار زیادی از آب دریا بخار شده و ایجاد تبخیری‌های بزرگی را می‌نماید. در سرزمین خشک و نیمه‌خشک ایران که به دلیل ویژگی‌های اقلیمی، میزان بارش سالانه نسبتاً پایین است، دریاچه‌های شور متعددی وجود دارند که حاوی مواد معدنی سودمندی است. عناصر اصلی در شورابه‌های کل دنیا عبارت‌اند از سدیم، منیزیم، پتاسیم، کلسیم، لیتیم، بر، ید، فلوئور، کلر، و آنیون‌های سولفات، کربنات، بی‌کربنات و در بعضی از شورابه‌های نادر نیترات می‌باشد.

تاکنون روش‌های مختلفی برای کاهش اثرات دفع پساب-ها و شورابه‌ها بر روی محیط زیست به کار گرفته شده‌اند که شامل تزریق آن‌ها به رودخانه‌ها و آب‌های سطحی، تبخیر پساب‌ها و استحصال نمک با استفاده از حوضچه-های تبخیری، تزریق پساب‌ها به درون چاه‌های عمیق، آبیاری زمین‌هایی که به شوری حساس نیستند و همچنین تبلور و تولید نمک جامد می‌باشند. برخی از این روش‌ها به نحوی همان مشکلات زیست‌محیطی را به دلیل



شدت شوری پسابها به دنبال دارند. به همین دلیل، اگرچه نمک‌زدایی آب‌های شور به عنوان یک فناوری جایگزین در تأمین آب شیرین مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما پیامدهای زیست‌محیطی آن نیز بایستی مورد توجه قرار گیرند. روش‌های مذکور دارای مزایا و معایبی هستند که در جدول (1) ذکر شده‌اند.

شده‌اند. (1) ذکر شده‌اند.

حوضچه‌های تبخیری طبیعی به منظور افزایش نرخ تبخیر، به سطح بسیار بالایی نیاز دارند. بدین معنی که نسبت بالای سطح به حجم منجر به افزایش نرخ تبخیر شورابه می‌شود. لذا، حوضچه‌های تبخیری، به‌ویژه در نواحی مرطوب به دلیل هزینه‌ی بالای زمین (چون به سطح زمین بالایی نیاز دارند) و نرخ پایین تبخیر مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. از طرفی به دلیل باز بودن سطح حوضچه‌ها، احتمال آلودگی محیط اطراف آن‌ها وجود دارد. چنانچه فرآیند تبخیر در حوضچه‌ها شدت پیدا کند، می‌توانند کوچکتر و با سطح کمتری ساخته شوند. در

حوضچه‌های تبخیری، حوضچه‌های سطحی هستند که شورابه در آن‌ها رها می‌شود و آب موجود در شورابه به سبب تابش خورشید و دمای هوا تبخیر شده و در نهایت نمک در کف حوضچه باقی می‌ماند. حوضچه‌های مذکور، به دلیل ساختار ساده و نیاز حداقل به قطعات مکانیکی و نیروی متخصص، به طور گسترده‌ای در نواحی خشک و نیمه‌خشک استفاده می‌شوند. لذا این حوضچه‌ها برای استفاده در نواحی خشک و نیمه‌خشک مناسب می‌باشند. در فرآیند استحصال نمک از حوضچه‌های تبخیری خورشیدی، تعدادی از حوضچه‌های سطحی (عمق بین

جدول 1: روش‌های دفع شورابه، مزایا و معایب (O'Reilly, 2009)

مزایا	معایب	روش دفع شورابه
<ul style="list-style-type: none"> <li>• فناوری پایین؛</li> <li>• تأمین مخزن ذخیره برای شورابه؛</li> <li>• کاهش اثرات بر روی آب‌های اطراف.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• نیاز به سطح وسیع؛</li> <li>• نیاز به شرایط آب و هوایی مطلوب؛</li> <li>• حجم‌های بالایی از نمک نیاز هست که دفع شود.</li> </ul>	حوضچه‌های تبخیری
<ul style="list-style-type: none"> <li>• فناوری پایین</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• نمک‌های سنگین ممکن است آبیگرها را آلوده کند.</li> </ul>	تزریق به آب‌های سطحی
<ul style="list-style-type: none"> <li>• فناوری پایین</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• نمک‌های سنگین ممکن است آبیگرها را آلود کند.</li> </ul>	تزریق به چاه‌های عمیق
<ul style="list-style-type: none"> <li>• فناوری پایین و ارزان</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• نمک‌های سنگین ممکن است آبیگرها را آلود کند.</li> </ul>	آبیاری
<ul style="list-style-type: none"> <li>• نمک بالا / بازبایی نمک جامد</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• هزینه‌ی بالا؛</li> <li>• از نظر فنی فرآیند پیچیده‌ای دارد.</li> </ul>	تبلور



شکل 1: نمای شماتیکی و واقعی از حوضچه‌های تبخیری خورشیدی.



حوضچه‌های تبخیری، حرارت ناشی از تابش خورشید، جریان طبیعی باد و دمای محیط منجر به تبخیر بخش قابل ملاحظه‌ای از آب موجود در شورابه شده و در نتیجه استحصال نمک انجام می‌شود. عوامل مؤثر بر افزایش و بهبود نرخ تبخیر در این حوضچه‌ها عبارتند از: افزایش فشار بخار، افزایش مساحت سطح، پارامترهای محیطی منطقه نظیر سرعت باد، دمای هوا، تابش خورشید، رطوبت نسبی و همچنین درصد املاح موجود در شورابه واضح است که افزایش بیشتر در نرخ تبخیر منجر به بهبود بازده و کاهش زمین مورد استفاده و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری می‌شود.



دکتر شیوا گرجیان

عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم

[shgorjian@yahoo.com](mailto:shgorjian@yahoo.com)



## گیاه استویا

امروزه به دلیل تغییر شیوه زندگی و تغذیه منابع قندی نامناسب توسط افراد، شیوع بیماری دیابت رو به افزایش است. در سال‌های اخیر مصرف نوشیدنی‌های فراسودمند با قند و کالری کمتر مورد توجه عموم قرار گرفته است. لذا با این‌که قند جزئی ضروری در جیره غذایی انسان است ولی استفاده از جایگزین‌های طبیعی قند به‌جای شیرین‌کننده‌های سنتزی کاربرد روزافزونی یافته است. در این میان استویا به‌عنوان یک گیاه دارویی و صنعتی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. قند استویا با شیرینی بیشتر از ساکارز، کالری کمتر و شاخص گلیسمی پایین که از برگ گیاه استویا به دست می‌آید، شیرین‌کننده گیاهی مناسبی است

استویا با نام علمی *Stevia rebaudiana bertonii* شناخته‌شده و از خانواده Asteraceae می‌باشد. جنس گیاه استویا دارای ۱۵۰ گونه علفی، درختچه‌ای و نیمه درختچه‌ای می‌باشد که در بین آن‌ها گونه *S. rebaudiana* به‌طور معنی‌داری شیرینی قابل قبولی دارد. ارتفاع گیاه به یک متر و عمر گیاه حداکثر به ۵ سال می‌رسد. ازدیاد گیاه در طبیعت عمدتاً از طریق بذر صورت می‌گیرد، استویا گیاهی روزکوتاه می‌باشد و با کوتاه شدن روز و سرد شدن هوا شرایط گل‌دهی گیاه استویا فراهم می‌شود. گیاه استویا اولین بار در کشور پاراگوئه شناسایی شد. آخرین یافته‌های علمی دانشمندان نشان می‌دهد که استفاده از برگ‌های گیاه استویا توسط بومیان منطقه

آمامی به بیش از ۱۵۰۰ سال قبل بازمی‌گردد. در سال ۱۸۹۹ میلادی این گیاه توسط گیاه‌شناس ایتالیایی، مویسس سانتیا گوبرتونی کشف شد.

هم‌اکنون در کشورهای زیادی از جهان (آلمان، ژاپن و آمریکا و ...) بر روی خواص آن تحقیقات انجام می‌شود. کشت آزمایشی استویا در اصفهان و گیلان آغاز گردیده است. بر اساس بررسی‌ها از هر هکتار مزرعه استویا در گیلان می‌توان سالانه تا ۶۱۱ کیلوگرم برگ خشک استویا به ارزش ۳۱ میلیون تومان برداشت کرد. این گیاه ۵۴ تا ۱۱۴ روز برگ دهی دارد و از طرفی ۴ تا ۵ سال هم می‌توان از گیاه استویا برداشت کرد.

نخستین موارد مصرف استویا کاربرد آن به‌عنوان یک گیاه طبی سنتی بوده است. استویا مورد تأیید "سازمان جهانی سلامت (WHO)" است و اخیراً به‌عنوان یک محصول رژیمی مورد تأیید "سازمان غذا و داروی آمریکا (FDA)" قرار گرفته است. عامل اصلی افزایش تقاضا برای مصرف استویا ناشی از اطلاع پژوهشگران از خواص کاهندگی قند خون و اثر کنترل‌کنندگی بر فشارخون بوده است. بنابراین این تفکر به وجود آمد که می‌تواند در محصولات غذایی شیرین نیز مورد استفاده قرار گیرد. با شناخته شدن قند-های استویا و یافته‌هایی که نشان می‌داد این ترکیبات جذب بدن نمی‌شود، کاربرد آن‌ها در محصولات غذایی رژیمی نیز رایج شد. به‌طوری‌که شرکت‌های کاکائولا و کارگیل از عصاره‌های استویا ربادیانا در محصولات آشامیدنی خود بهره گرفتند و امتیاز نام تجاری ربادیانا را برای محصولات رژیمی شرکت خود به ثبت رساندند.







از نقطه نظر اقتصادی استفاده از شیرین کننده های استویا مقرون به صرفه می باشد و مزایای اقتصادی بیشتری را متوجه واحدهای تولیدی می نماید. با توجه به این نکته که تنها 2 گرم از شیرین کننده های استویا جایگزین وزنی معادل یک کیلوگرم شکر می گردد، موجب می شود این طرح از نظر اقتصادی نیز قابل توجیه باشد. کاهش تولید جهانی شکر نیز موجب گردیده است تا کارخانه های تولیدکننده محصولات کم کالری به استفاده از چنین ترکیباتی ترغیب شوند. امید است در کنار پژوهش در حوزه کاشت، داشت، برداشت و فرآوری این گیاه، با ترویج این گیاه در بخش کشاورزی بتوان زمینه را برای گسترش سطح زیر کشت آن در ایران فراهم کرد.



حافظ جعفری

دانش آموخته ی مهندسی مکانیک بیوسیستم

[Hafez.Jafari@yahoo.com](mailto:Hafez.Jafari@yahoo.com)

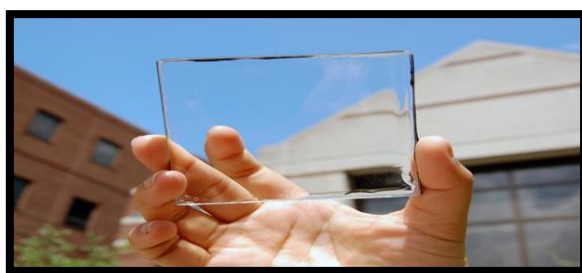
(Methylammonium lead iodide perovskite) می‌باشد. خصوصیات اپتیکی بسیار خوب از جمله ضریب جذب بالا و گاف انرژی مناسب، باعث شده تا این ترکیبات برای کاربردهای جذب نور (Light harvesting) در زمینه فوتولتائیک بسیار مناسب باشند. متیل آمونیوم سرب یدید یک ترکیب نیمه هادی ambipolar است که می‌تواند هم الکترون‌ها و هم حفره‌ها را به الکترودهای جمع کننده مربوطه انتقال دهد. به این دلیل است که سلول‌های خورشیدی پروسکایتی حتی در عدم حضور لایه انتقال دهنده حفره و یا رسانای الکترون (Electron conductor) نیز می‌توانند عمل کنند. خصوصیات منحصر به فرد پروسکایت سرب یدید، همچنین قیمت پایین و سادگی فرآیندپذیری موجب شده تا این ترکیب برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی نسل سوم با بازده بالا و ارزان، بسیار مطلوب باشد. ساختار سلول خورشیدی متخلخل پروسکایتی استاندارد (Standard mesoscopic perovskite solar cell) از شیشه پوشش داده شده با FTO، لایه ای  $TiO_2$  به عنوان ماده انتقال دهنده الکترون و داربست، لایه جاذب نور پروسکایت، لایه انتقال دهنده حفره و الکتروود پشتی طلا یا نقره تشکیل شده است

## پنل‌های خورشیدی نیمه‌شفاف

انرژی خورشیدی هم‌اکنون نه تنها سیری صعودی طی می‌کند، بلکه در بسیاری از کشورها، به‌عنوان ارزان‌ترین و مقرون به‌صرفه‌ترین شکل انرژی در دسترس است. اما در میان تمام سخت‌افزارها و پنل‌های خورشیدی، ابزارهای دیگری هم هستند که آن‌ها را از دست داده‌ایم. در واقع هنگامی که به پنل‌های خورشیدی فکر می‌کنیم، تمایل داریم که پنل‌های بزرگ یا آرایه‌های خورشیدی روی پشت بام خانه‌ها و ساختمان‌ها را تصور کنیم، با این حال نوع دیگری از فناوری‌های خورشیدی در حال ساخت و طراحی هستند که به‌صورت نامرئی می‌باشند.

### سلول خورشیدی نیمه شفاف پروسکایتی:

درسال‌های اخیر شاهد گسترش سریع سلول‌های خورشیدی نوظهور، که اغلب نسل سوم نامیده می‌شوند، بوده‌ایم. سلول‌های خورشیدی بر پایه پروسکایت هالید آلی-معدنی، به این دسته تعلق دارند. بازده سلول‌های خورشیدی با استفاده از این مواد از ۸/۳٪ در سال ۲۰۰۹ به بازده تایید شده ۲/۱۶٪ در



که این الکتروود می‌تواند با ترکیبات دیگر هم‌چون کربن جایگزین شود. یک تیم تحقیقاتی کره‌ای، به سرپرستی پروفیسور Seunghyup Yoo از موسسه عالی علم و صنعت کره و پروفیسور Nam-Gyu Park از دانشگاه SungKyunKwan با استفاده از پروسکایت‌ها نوعی سلول خورشیدی نیمه‌شفاف طراحی کرده‌اند که بسیار کارآمد است و به

پایان سال ۲۰۱۳، ۹/۱۷٪ در سال ۲۰۱۴ و در حال حاضر، طبق گزارش رسمی NRE به بازده ۱/۲۲٪ رسیده است که این بازده بسیار نزدیک به بازده سلول‌های خورشیدی سیلیکونی CIGS می‌باشد. لایه جاذب نور در این نوع سلول‌های خورشیدی شامل یک ترکیب با ساختار پروسکایت است که معمول‌ترین آن یک هیبرید آلی-معدنی سرب



تولید انرژی برق، به ما در مدیریت هوشمند حرارتی در فضاهای داخلی کمک می‌کند و باعث می‌شود از انرژی خورشیدی به طور کارآمدتر و موثرتری بهره‌برداری کنیم.

یکی از چالش‌های عمده در این پروژه‌ها این است که شفافیت در سلول‌های خورشیدی موجب می‌شود تا بهره‌وری این سلول‌ها در جذب نور خورشیدی که برای تولید برق به آن نیاز دارند، کاهش یابد. نمونه‌های معمول و امروزی سلول‌های خورشیدی از سیلیکون کریستالی ساخته شده‌اند که شفاف ساختنشان دشوار است. همین امر دانشمندان را به فکر انداخته تا به دنبال جایگزینی برای آن‌ها باشند. در مقابل، به طور معمول از سلول‌های خورشیدی نیمه‌شفاف هم‌چون مواد آلی یا حساس به رنگ استفاده می‌شود، اما در مقایسه با سلول‌های مبتنی بر سیلیکون کریستالی، بازده قدرت تبدیل آن‌ها کم است. امروزه پروسکایت‌ها از مهم‌ترین رقبای سلول‌های سیلیکون کریستال به شمار می‌روند. پروسکایت‌ها ترکیبی از مواد فوتوولتائیک آلی و غیرآلی هستند که برای تولید ارزان و برای ساخت آسان هستند. این مواد در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه واقع شده‌اند تا جایی که کارایی این سلول‌های خورشیدی پروسکایت در چند سال گذشته به سرعت به سطح فناوری‌های سیلیکون افزایش یافته است.



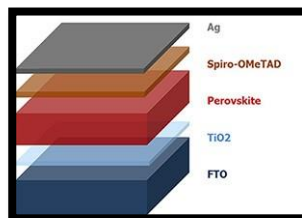
مهدی نوجوان

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم

mehdinojavan91143@gmail.com

عنوان یک آینه حرارتی موثر عمل می‌کند. یعنی علاوه بر تولید برق، اشعه مادون قرمز را بازتاب می‌کند و اجازه ورود آن به فضاهای داخلی را نمی‌دهد.

یکی از راهکارهای کلیدی برای دستیابی به سلول‌های خورشیدی نیمه‌شفاف، تولید الکترودهای شفاف برای سطح رویی سلول‌هاست که با مواد فعال نوری سازگار باشد. این تیم کره‌ای یک الکتروده بسیار شفاف (TTE) تولید کرده که در سلول‌های خورشیدی پروسکایت به خوبی عمل می‌کند. این الکتروده چند لایه‌ای از یک لایه فلزی بسیار نازک تشکیل شده است که در میان یک لایه با ضریب شکست نور بالا و یک لایه سطحی و بیرونی قرار گرفته است. با قرار گرفتن این الکتروده بسیار شفاف بر روی سطح بیرونی سلول خورشیدی، سلول‌های پروسکایت می‌توانند به خوبی و بدون هیچ خللی عملکرد خود را داشته باشند. مزیت استفاده از این نوع الکتروده شفاف این است که نه تنها مانند الکترودهای شفاف معمول، نور مرئی را از خود عبور می‌دهد، بلکه علاوه بر آن اشعه مادون قرمز را بازتاب می‌کند. سلول‌های خورشیدی ساخته‌شده با این



فناوری جدید، دارای راندمان تبدیل با میانگین 13/3 درصدی هستند و همچنین 85/5 درصد از نور مادون قرمز را نیز بازتاب می‌کنند. اگرچه سلول‌های خورشیدی موجود (کریستال سیلیکون) راندمان تبدیل بالاتری دارند (میانگین تبدیل 25 درصد)، ولی تیره و مات هستند و به هیچ عنوان شفافیت این سلول‌های جدید را ندارند.

این تیم کره‌ای معتقد است که استفاده از سلول‌های خورشیدی نیمه‌شفاف پروسکایت به جای پنجره ساختمان‌ها، نورگیرها و شیشه‌های اتومبیل، علاوه بر

## ادعای ثبت اختراع

اینجانبان:

محمد صادقی و احمد بناکار

مدعی هستیم که اختراع راجع به:

"دستگاه تشخیص بیماری طیور از روی سیگنال‌های قلب و صدا" را برای اولین بار ساخته‌ایم و این دستگاه نمونه داخلی/خارجی ندارد.

## مشکل فنی و بیان اهداف اختراع:

صنعت مرغداری به عنوان یک منبع درآمد و زیرشاخه‌ای از فعالیت‌های کشاورزی محسوب می‌گردد. با توجه به نحوه پرورش مرغ و سرمایه اندک برای انجام آن، در اثر فروش انواع مختلف محصولات مرغ از جمله جوجه، تخم مرغ، مرغ تخم‌گذار و خروس برای کشاورز درآمد جانبی حاصل می‌گردد. در این بین تغذیه و بهداشت طیور قسمت مهمی از وظایف مرغداری مدرن امروز را تشکیل می‌دهند. یکی از نیازهای ضروری تغذیه انسان، تأمین پروتئین حیوانی است. گوشت طیور به عنوان یک منبع با ارزش پروتئینی، در سال‌های اخیر در تغذیه انسان، در ایران و جهان مورد استفاده قرار گرفته است. در میان انواع گوشت‌ها، گوشت مرغ اهمیت خاصی دارد. زیرا هم سریع‌تر تولید می‌شود و هم هزینه تولید آن نسبت به گوشت سایر دام‌ها کمتر است. از طرفی درصد پروتئین گوشت مرغ از سایر طیور بیشتر بوده و ضریب تبدیل غذا به گوشت در مرغ نسبت به سایر دام‌ها بهتر می‌باشد. مرغ و به طور کلی طیور، حیوانات حساسی هستند. مسئله تغذیه می‌تواند از دو نظر بهداشتی و اقتصادی قابل اهمیت باشد. از نظر بهداشتی، مرغ هنگامی می‌تواند به طور کامل رشد کند که تمام مواد مورد نیاز بدن از طریق تغذیه در اختیار او باشد. از نظر اقتصادی نیز باید توجه داشت که بخشی از مخارج روزمره مرغداری را هزینه‌های مربوط به

غذا تشکیل می‌دهد. علاوه بر این موارد، مسئله بهداشت و مراقبت از طیور هم مطرح می‌باشد. گاهی اوقات ممکن است مرغدار متوجه بیماری جوجه نگردد و این بیماری فراگیر شود و مرغدار را مجبور به معدوم نمودن گله نماید.

سه بیماری نیوکاسل، آنفلوانزا و برونشیت عفونی از جمله بیماری‌هایی هستند که هر ساله خسارات اقتصادی فراوانی را به صنعت مرغداری تحمیل می‌کنند.

در این اختراع با طراحی و ساخت دستگاهی جهت تشخیص بیماری‌های نیوکاسل، آنفلوانزا و برونشیت از روی سیگنال‌های قلب و صدا، برای مرغدار این امکان فراهم می‌شود که بدون نیاز به از دست دادن وقت در تعیین نوع بیماری توسط دامپزشک، قبل از آنکه بیماری کل گله را آلوده کند، به وجود بیماری در مراحل اولیه پی ببرد و برای درمان آن چاره‌ای بیندیشد.

## توضیح حداقل یک روش اجرایی برای اختراع:

این اختراع در تمامی مرغداری‌ها با نصب میکروفون در نقاط مختلف و همچنین استفاده از گوشی ثبت صدای قلب قابل کاربرد بوده و استفاده از آن بسیار راحت است به نحوی که مرغدار در روزهای اولیه وجود بیماری می‌تواند از بیماری درون گله آگاه شود و در پی چاره باشد.



محمدحسین رحمانی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم

[m.h.rahmani71@gmail.com](mailto:m.h.rahmani71@gmail.com)



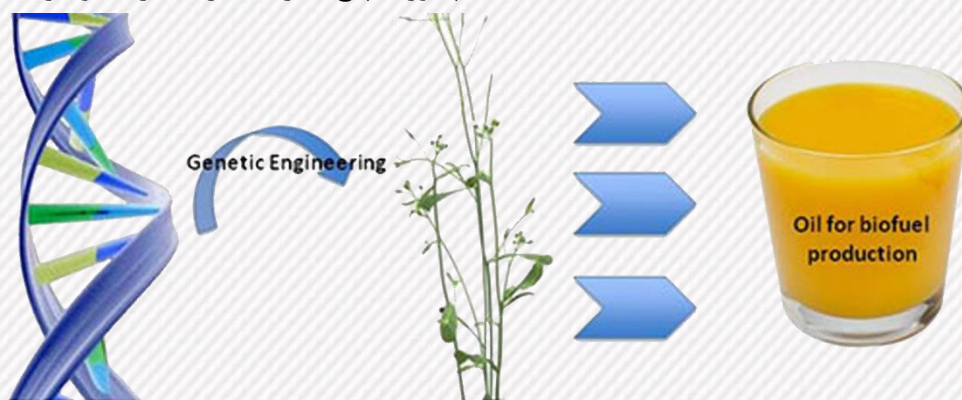
ذخیره شده در زیست توده لیگنوسلولوزیک، مطالعه ترکیبات بیوشیمیایی زیست توده بسیار ضروری است و یکی از پایه‌های عملیاتی برای بازیابی محصول تجاری تلقی می‌شود. ترکیبات بیوشیمیایی اصلی در توده‌های لیگنوسلولوزیک عبارتند از سلولز، همی سلولز و لیگنین.

تا به امروز، از روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و فیزیکی شیمیایی به عنوان تیمار برای تخریب بافت گیاهی به منظور تسهیل سوخت‌های زیستی استفاده شده است. که این تکنیک‌ها شامل استفاده از اسید و باز، انفجار با بخار آمونیاک، تیمار یونی، organosolv، تخریب با استفاده از آزون، تیمار بخار، اکسیداسیون مرطوب و اشعه مایکروویو هستند. با این حال، هزینه‌ی عملیاتی بالا، تشکیل مهار کننده‌ها، گرم شدن زیست توده در اثر تابش اشعه، شستشو زیست توده تحت تیمار، از بین رفتن مواد همی سلولازی و عدم اطمینان از اتانول تولید شده، جامعه علمی را مجبور به کشف یک تکنولوژی جایگزین یعنی میکروارگانیسیم‌ها به منظور دور زدن این معایب متمایل کرد با این وجود میکروارگانیسیم‌ها قابلیت تجزیه قندهای پنتوز (پنج کربنه) را ندارند و زیست توده‌های

## بهبود تولید سوخت‌های زیستی با استفاده از بیوتکنولوژی

در جوامع امروزی به دلیل گسترش فرهنگ شهرنشینی، کاهش منابع فسیلی و افزایش آگاهی عمومی از تهدیدات محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای که به واسطه منابع نفتی ایجاد می‌شوند، باعث شده است که تمایل به سمت استفاده از اتانول به عنوان یک سوخت بیولوژیک به طور غیر مستقیم افزایش یابد. با درک دنیای مدرن و کشف منابع سوخت‌های تجدیدپذیر که به طور فراوانی در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف جهان وجود دارند، بیوتکنولوژی می‌تواند جایگاه برجسته‌ای در زمینه تولید این سوخت‌ها و اقتصاد زیستی آن‌ها نقش ملی داشته باشد. اقتصاد مبتنی بر زیست بومی، تحکیم و پایداری تولید، قابلیت دستیابی و بهره‌برداری از محیط زیست از نقاط تکنولوژیکی مهم در تولید انرژی‌های زیستی به شیوه ای سازگار از محیط زیست هستند.

در میان سوخت‌های موجود، تولید اتانول از توده‌های لیگنوسلولوزی فرایند رو به رشدی دارد و نظر محققان را



Single copy of transgene

Transgenic Arabidopsis plant

لیگنوسلولوزی علاوه بر سلولز و همی سلولز دارای قندهای پنج کربنه فراوانی هستند که میکروارگانیسیم‌ها قادر به تولید اتانول از آن‌ها نیستند و در این شرایط بیوتکنولوژی می‌تواند کمک شایانی به بهبود حداکثری تولید اتانول به عنوان سوخت پاک از زیست توده‌های موجود کند از این

در سراسر جهان به خود جلب کرده است. نکته قابل توجه اینکه؛ از نظر تئوری تولید بیواتانول از قند و نشاسته نسبت به تولید آن از مواد اولیه لیگنوسلولوزی برتری دارد؛ و این امر به دلیل تداخل با منبع غذایی جامعه، تولید بیواتانول از شکر و قند را به چالش می‌کشد. برای استفاده از انرژی



دیدگاه، پیش تیمار این زیست توده‌ها با استفاده از آنزیم-های مختلف می‌تواند تولید اقتصادی این سوخت‌ها را رونق بخشد. در این میان، برای تجزیه لیگنین که در مجاورت سلولاز و همی سلولاز در زیست توده وجود دارد می‌توان از کنسرسیون‌های لیگنینولیتیک مانند لیگنین پراکسیداز (لیپین‌ها)، پراکسیداز منگنز (MnP)، لاکاس و پراکسیداز چندمنظوره (VPS) برای تولید اتانول بر پایه زیستی استفاده نمود. همچنین در این راستا می‌توان آنزیم‌های درگیر در این فرایند را به منظور ارتقای خاصیت اتصال به لیگاند مورد نظر، مهندسی کرد تا حداکثر کارایی تولید محصول از ماده اولیه را داشته باشد. همچنین گیاهان قابلیت این را دارند که با مهندسی مسیرهای متابولیتی، از بلوک‌های ساده موجود در ساختمان خود مواد با اهمیتی به عنوان سوخت تولید کنند. از طرف دیگر می‌توان با تغییر محتوا، محل و نوع لیگنین، باعث افزایش میزان تولید اتانول شد به عنوان مثال افزایش بیان ژن COMT در نوعی علف (switchgrass) باعث افزایش میزان فرم G:S lignin در گیاه و در نتیجه افزایش اتانول شده است. محققان در یک تحقیق دیگر دریافته‌اند که کاهش بیان ژن cinammoyl-CoA reductase باعث کاهش رشد گیاه و در نهایت بهبود تولید اتانول می‌شود.



فرشاد داودی

دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد بیوتکنولوژی کشاورزی

F\_davoodi@modares.ac.ir





## دانشگاه نسل سوم، انقلاب صنعتی چهارم

دکتر برات قبادیان معاون آموزش، پژوهش و فناوری وزارت صنعت، معدن و تجارت و استاد دانشگاه تربیت مدرس گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم در نشست با اساتید و

اساتید و

دانشجویان

دانشگاه تربیت

مدرس به

تشریح دانشگاه

نسل سوم و

انقلاب صنعتی

چهارم پرداخت.

ایشان ارتباط

صنعت و

دانشگاه را

شاهرگ پیکره‌ی توسعه‌ی اقتصاد در دنیای پرشتاب کنونی عنوان کردند.

ایشان در ادامه با بیان اینکه این امر بدون همراهی علم (مجامع دانشگاهی) و عمل (صنایع) میسر نمی‌شود، لزوم آموزش علم همراه عمل به نیروی کار را تاکید داشتند. توسعه‌ی اقتصادی دنیای امروز بر پایه‌ی نوآوری، خلاقیت و استفاده از دانش استوار بوده و بزرگترین سرمایه‌های یک بنگاه اقتصادی منابع انسانی یا نیروهای اهل فکر، یادگیرنده و خلاق هستند و این نیروها کسانی جز کارآفرینان نیستند.

دکتر قبادیان عوامل اصلی تعیین کننده‌ی سطح تکنولوژی را نسبت درصد بودجه تحقیقاتی به کل درآمد ناخالص ملی، و سطح علمی کشور را نسبت تعداد پژوهشگران در یک میلیون نفر از جمعیت کل کشور بیان نمودند.

ایشان دانشگاه در حال گذار را به صورت نسل اول با محور آموزش، نسل دوم با محورهای آموزش و پژوهش و نوآوری دانشگاه نسل سوم را با محوریت آموزش، پژوهش، نوآوری و فن آفرینی که در آخر با انقلاب صنعتی چهارم به دانشگاه کارآفرینی خواهیم رسید، بیان نمودند. از جمله حوزه‌های

فعال و اساسی در

انقلاب صنعتی

چهارم و تلفیق

تکنولوژی‌ها می‌توان

به پربنتر سه بعدی،

کشاورزی، شهر،

کارخانه، خانه، تولید

و سلامت هوشمند

اشاره کرد.

موانع ناشی از

عملکرد ضعیف

دانشگاه و صنعت به گفته‌ی دکتر قبادیان موانع آموزشی و تحقیقاتی، همچنین عدم اطمینان صنعت به دانشگاه، نبود فرهنگ مشاوره در صنعت و توجه ناکافی به آموزش در بخش صنعت می‌باشد. بنابراین معاون وزارت صنعت، معدن و تجارت به همکاری‌های این وزارت با وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در قالب طرح‌های پسا دکتری صنعتی و فرصت مطالعاتی داخل کشور، ارتباط شهرک‌های صنعتی با پارک‌های علم و فناوری، کارآموزی دانشجویان مقاطع کاردانی و کارشناسی، حمایت از پایان‌نامه‌های کارشناسی ارشد و دکتری و حمایت‌های وزارت صنعت، معدن و تجارت از دانشگاه‌ها اشاره کردند.

کشور ایران نیازمند تحول اساسی در اقتصاد دانش‌بنیان بوده و راه حل اساسی طرح در راستای انقلاب صنعتی چهارم و دانشگاه نسل سوم توانمندسازی تولید و توسعه اشتغال پایدار (تاپ) است. به گفته‌ی دکتر قبادیان لازم-ی چنین فرآیندی ورود نیروی انسانی دانش‌آموخته و







توانمند به نظام برنامه‌ریزی و اجرایی بنگاه‌ها و تحقق اشتغال فزاینده و زایشی، به عنوان راهبردی که ذیل توسعه دانش‌بنیان و خلق ارزش افزوده‌ی دانشی هدف-گذاری شده است، می‌باشد.

دامنه‌ی پوشش طرح تاپ، استادان دانشگاه، دانشجویان کارشناسی ارشد و دکتری دانشگاه‌ها و موسسات آموزش عالی کشور در دوران انجام تحقیق و دانش‌آموختگان دوره‌های کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری دانشگاه-ها و موسسات آموزش عالی کشور پس از گذراندن دوران آموزشی خدمت نظام وظیفه می‌باشد.



هانیه صمدی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم

[hhaniyehsmd@gmail.com](mailto:hhaniyehsmd@gmail.com)





## ترموالکتريک

اوایل قرن نوزدهم آقایان Jean و Thomas Seebeck و Peltier، توانستند پدیده‌ای را که پایه صنعت ترموالکتريک امروز است، کشف کنند. Seebeck یافت که اگر در محل اتصال دو هادی غیر مشابه اختلاف دما ایجاد نماید، جریان الکتريکی جاری می‌شود. از طرفی دیگر، Peltier ثابت کرد که جریان عبوری از میان دو هادی غیر مشابه، باعث می‌شود که گرما یا منتشر شود و یا در محل اتصال جذب شود.

علم تبدیل گرما به انرژی الکتريکی این امکان را فراهم می‌آورد که انرژی حرارتی اتلافی بصورت انرژی الکتريکی ذخیره شود. این نوع تبدیل به دلیل تجدیدپذیر بودن علیرغم بازده کم آن مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات و پیشرفت‌های بدیعی در ساخت مواد و تراشه‌های جدید در اندازه نانومتری در حال انجام است. با وجود آن که تحقیقات گسترده‌ای برای تولید نانو ساختارها و نانو مواد برای کاربرد ترموالکتريک در حال انجام است، ولی هنوز ماده‌ای که بتواند به طور قاطع برای این کاربرد معرفی شود، ساخته نشده و ساخت ماده مناسب باعث خواهد شد روش ترموالکتريک در میان روش‌های استحصال انرژی، جایگاه ویژه‌ای داشته باشد. مهم‌ترین کاربرد ترموالکتريک در زمینه ذخیره انرژی، بازیافت حرارتی ماشین‌های گرمایی، به خصوص در حمل‌ونقل و تبدیل حرارت بدن انسان به انرژی است. استحصال انرژی به کمک روش ترموالکتريک دارای چندین مانع از جمله بازدهی کم، سمی بودن و دسترسی محدود به عناصر شیمیایی که در ترکیبات مواد ترموالکتريک بکار می‌روند، است. در این زمینه چالش اصلی فناوری نانو بهبود بخشیدن بازدهی مواد ترموالکتريک با هزینه ساخت کم می‌باشد.

همانطور که گفته شد ترموالکتريک‌ها به دو صورت کار می‌کنند: 1- تبدیل گرما به انرژی الکتريکی، 2- تبدیل انرژی الکتريکی به گرما و سرما

### 1- تبدیل گرما به انرژی الکتريکی (Thermoelectric Power Generation)

وقتی تراشه ترموالکتريک در محیطی قرار گیرد که اختلاف دما بصورت پایدار بین دو سطح آن وجود داشته باشد، شارش انرژی حرارتی در چنین محیطی باعث تولید انرژی الکتريکی می‌شود. حتی با بازدهی متوسط، این پدیده می‌تواند مزیت فراوانی داشته باشد.

در حقیقت به دلیل اتلاف و نشت انرژی حرارتی موضعی انتظار می‌رود که از این پدیده در کاربردهای فراوان و متنوع برای تولید انرژی الکتريکی موضعی استفاده کرد. مهم‌ترین مشخصه این تراشه‌ها فقدان قسمت‌های مکانیکی، امکان کاربری پاک و بی‌صدا، ابعاد کوچک و وزن سبک، قابلیت اطمینان و نیز شرایط نگهداری و تعمیر ساده است. مانع اصلی در تجاری‌سازی این فناوری، کارآمدی ناچیز آن است. ماده ترموالکتريک خوب، باید قابلیت بالای تبدیل گرما به الکتريسیته را داشته باشد تا ولتاژ مورد نیاز را تولید کند. برای حصول این خاصیت باید هدایت الکتريکی ماده زیاد باشد. همچنین هدایت حرارتی باید تا حد امکان کم باشد تا از اتلاف انرژی حرارتی به محیط جلوگیری شود. این خواص با فاکتوری به نام ZT اندازه‌گیری می‌شوند. در سراسر دنیا تحقیق در مورد نیمه‌رساناهای جدید که فاکتور ZT بالایی دارند بسیار فعال است. در حال حاضر مواد ترموالکتريک مقادیر ZT یک یا کمتر را دارا هستند. یک تخمین گسترده جمعی ZT اجازه گسترش بیشتر ترموالکتريک را می‌دهد.

اخیرا برای افزایش بازده این ابزارها از اتصال نیم رسانا p-n استفاده کرده‌اند. در شکل (۱) نمای شماتیک از اتصالات p-n آورده شده است.



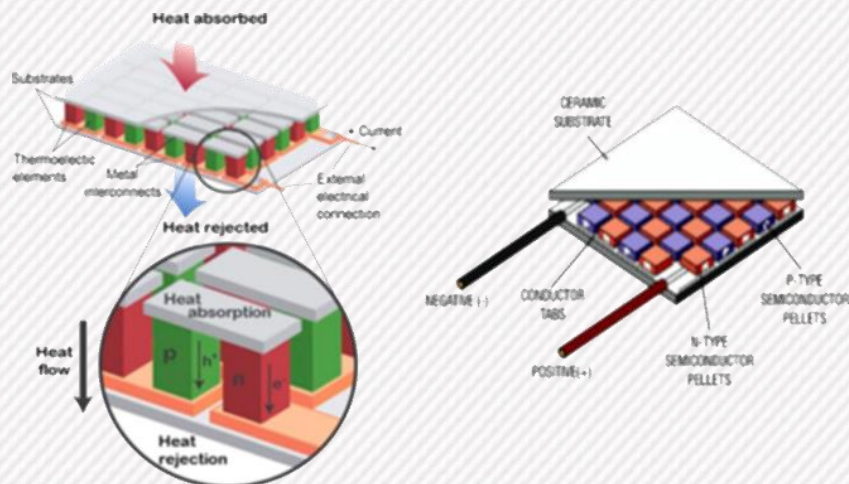
کند. با این کار مصرف سوخت چندین برابر کاهش خواهد یافت.

از کاربردهای دیگر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- سیستم‌های تلفیقی فتوولتائیک و ترموالکتریک برای تولید همزمان توان الکتریکی از نور و حرارت خورشید (STEG)
  - نصب ترموالکتریک‌ها بر روی سیستم‌های تولید همزمان قدرت و حرارت
  - استفاده هواپیماها، هلیکوپترها و کشتی‌ها
  - بازیافت حرارت در تمامی مراکز صنعتی
- به‌تازگی محققان توانسته‌اند به‌وسیله ترموالکتریک‌ها لباسی طراحی کنند تا با گرمای بدن انسان، الکتریسیته تولید کند. سال گذشته وشایی و تیمش دستگاه کوچکی ساختند که هم از انرژی ترموالکتریک استفاده می‌کرد و هم قابل استفاده در لباس و یا بازو بود.

## 2- تبدیل انرژی الکتریکی به گرما و سرما (TEC)

المان سرد کننده یا TEC، قطعه‌ای الکترونیکی متشکل از تعدادی نیمه هادی نوع N و نیمه هادی نوع P است که به‌وسیله‌ی رسانا به یکدیگر متصل شده‌اند. TEC مخفف ThermoElectric Cooling است. TEC ها با استفاده از اثر پلتیر (Peltier) بین دو طرف قطعه، شارش گرما ایجاد می‌کنند. این قطعه با استفاده از انرژی الکتریکی،



شکل ۱: نمای شماتیک از اتصالات p-n در TEG

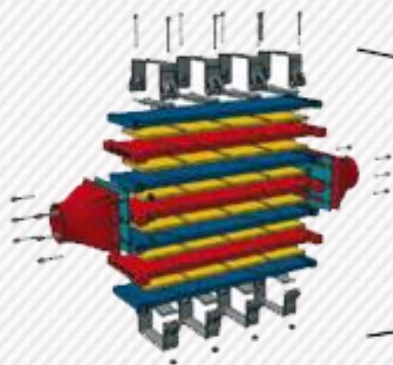
این نیم رساناها از مواد جدیدی مثل تلورید بیسموت (BiTe)، اسکوترودیت (CeFeSb)، روی بریلیم (ZnBe)، سیلیکون ژرمانیوم (SiGe)، تلورید قلع (SnTe)، ساخته شده‌اند. ترموالکتریک‌هایی نیز از مواد نانو کریستال و نانو سیم ساخته شده‌اند که بازده آن‌ها ۸-۵ درصد افزایش یافته است.

## کاربردهای ترموالکتریک‌ها (TEG):

از ترموالکتریک‌های تولید توان در تمامی قسمت‌هایی که اتلاف حرارتی وجود دارد، می‌توان استفاده کرد. به عنوان مثال شرکت‌های بزرگ اتومبیل‌سازی همچون BMW، Honda، Renault، FORD در صدد تولید توان از حرارت هدررفت اگروز اتومبیل‌ها هستند. شرکت BMW با استفاده از مبدل حرارتی پوسته، لوله و ترموالکتریک‌های 20 وات با ظرفیت دمایی بالا، توانست ۷۵۰ وات انرژی الکتریکی تولید کند.

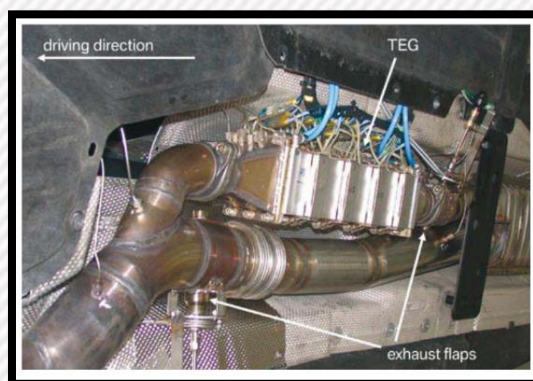
هدف شرکت BMW در استفاده از ترموالکتریک‌ها حذف دینام از سیستم شارژ اتومبیل برای کاهش بار از روی موتور و همچنین کاهش مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای است. البته این شرکت در چشم انداز بیست ساله خود آورده است که اتومبیل‌های هیبریدی تولید خواهد کرد تا با طی مسافت کوتاهی توسط سوخت، باتری‌های اتومبیل را برای پیمودن مسافت طولانی شارژ





گرما را با توجه به جهت عبور جریان، از یک سوی قطعه به سوی دیگر

هدایت می‌کند. طبیعی است که به علت مصرف انرژی الکتریکی، گرمایی که دفع می‌شود از گرمایی که در طرف مخالف قطعه جذب می‌شود، بیشتر است. این قطعه را با نام‌هایی مانند المان سرد کننده، TEC، کولر ترموالکتریک و یخچال حالت جامد نیز می‌شناسند.



خنک‌کننده‌های ترموالکتریک در برنامه‌های کاربردی که نیاز به حذف حرارت زائد اعم از میلی وات تا چند هزار وات دارند، استفاده می‌شوند. از آن‌ها می‌توان در موارد کوچک به عنوان مثال در خنک‌کننده‌های نوشیدنی، در زیردریایی یا ماشین‌های راه‌آهن استفاده کرد. ترموالکتریک‌ها عمر محدودی دارند و قدرت سلامت آنها را می‌توان با تغییر مقاومت AC آنها (ACR) اندازه‌گیری کرد. هنگامی که یک TEC، کهنه یا فرسوده می‌شود ACR آن افزایش خواهد یافت.



آرمین فتاح‌پور

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم

arminfattahpuor@gmail.com







ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

## Fuel Processing Technology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/fuproc](http://www.elsevier.com/locate/fuproc)

## Optimization of methyl ester production from waste cooking oil in a batch tri-orifice oscillatory baffled reactor

Masoud Dehghani Soufi<sup>a</sup>, Barat Ghobadian<sup>a,\*</sup>, Gholamhassan Najafi<sup>a</sup>, S. Mohammad Mousavi<sup>b</sup>, Joelle Aubin<sup>c</sup><sup>a</sup> Mechanical and Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran<sup>b</sup> Chemical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran<sup>c</sup> Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, France

## ARTICLE INFO

## Keywords:

OBR reactor  
biodiesel  
waste cooking oil  
process intensification  
RSM

## ABSTRACT

Transesterification of vegetable oils is a common route for the production of biodiesel. This reaction is a slow mass transfer limited reaction that has been shown to benefit from process intensification reactors such as the Oscillatory Baffled Reactor (OBR). The use of waste cooking oil as a resource is an attractive alternative to other virgin vegetable oils that will enable the capital costs of biodiesel production to be largely decreased, thereby making biodiesel an affordable and competitive fuel. In this study, optimization of biodiesel, or fatty acid methyl ester (FAME) production from waste cooking oil (WCO) was investigated using a batch OBR (diameter = 0.06 m, height = 0.55 m) with multi-orifice baffles, which have been recommended for scale-up. Response Surface Methodology (RSM) was applied to study the effects and interaction of different operating parameters: oscillation frequency (in the range 2.4–4.9 Hz), inter-baffle spacing (in the range 0.05–0.09 m) and reaction temperature (in the range 40–60 °C). It was found that temperature is the main factor influencing reaction yield and the interaction between temperature and oscillation frequency is non-negligible. Inter-baffle spacing does not, however, have a significant effect on the reaction. This is different from the design recommendations of OBRs in the literature, which were originally developed for single orifice baffles. An optimal reaction yield of 81.9% was obtained with an oscillation frequency of 4.1 Hz and an inter-baffle spacing of 5 cm (i.e. approximately 1.5*d<sub>c</sub>*) at a temperature of 60 °C. However, similar reaction yields could be obtained for different values of inter-baffle spacing.

## 1. Introduction

Biodiesel is promoted as a renewable and sustainable supplement for petroleum diesel and has received much attention in research over the last decades as it is a biodegradable and non-toxic fuel source. Biodiesel, often referred to as fatty acid methyl ester (FAME), is characterized as the alkyl esters of long chain of fatty acids derived from vegetable oils or animal fats. Indeed, the feedstock plays the most important role in biodiesel production process cost, comprising 70–90% of the biodiesel price. Therefore, waste cooking oils (WCOs), which are two or three times cheaper than virgin vegetable oils, are of high interest in biodiesel production [1,2], thereby potentially making it a sustainable substitute for petroleum diesel. Furthermore, collecting and reusing WCOs as a biodiesel feedstock or other bio-sourced derivatives, such as bio-lubricants [3,4], bio-asphalts [5] and bio-based surfactants [6], instead of discarding them into sewers can significantly decrease costs of treating waste waters [3]. It should be pointed out that

however, the use of WCO for biodiesel production may require extra pre-treatment processing due to the presence of free fatty acids (FFA), water and other impurities which can hinder the performance of the FAME producing reaction.

Amongst different biodiesel production technologies, including such as pyrolysis, alcoholysis, co-feeding with petroleum feedstock etc., transesterification has been one of the most common and preferred chemical modification processes [7,8]. In this reaction, glycerides react with a short chain alcohol, such as methanol or ethanol, in presence of an alkaline, acid or enzyme catalyst. At the beginning of the reaction, oil and methanol form an immiscible liquid-liquid mixture that is mass transfer controlled due to the low solubility of these reactants. As the reaction occurs, however, the intermediates (diglycerides, mono-glycerides) and methyl ester act as an emulsifier and the reaction medium is an emulsion of fine drops (or pseudo-homogeneous phase) [9–12]. In the final stage of the reaction, the products (methyl esters and glycerol), which are immiscible, form two distinct liquid phases

\* Corresponding author.

E-mail address: [ghobadib@modares.ac.ir](mailto:ghobadib@modares.ac.ir) (B. Ghobadian).





again. The high difference in densities between glycerol and methyl ester causes phenomena such as stratification, which can lead to an incomplete reaction if there is no sufficient mixing, since most of the catalyst resides in glycerol phase [13,14]. The most important limitation in biodiesel production, however, is the mass transfer process and it is therefore vital to mix the reactants, which have significantly different viscosities, effectively such that high interfacial area is created and mass transfer is enhanced. Previously, some important issues in biodiesel synthesis reaction, such as modeling of reaction kinetics and mass transfer, effects of different feedstocks and alcohols as well as other main reaction parameters have been investigated comprehensively in a mechanistic approach [14,15].

An oscillatory baffled reactor (OBR) is composed of a tube containing equally spaced orifice plate baffles. The oscillatory flow generates vortices near the baffles and thereby improves radial mixing and plug flow [16,17] and enhances heat and mass transfer [18,19]. In OBRs, the amplitude and frequency of oscillation are independent parameters that control the mixing process. The governing dimensionless groups for oscillatory flow mixing are [20]:

$$Re_o = \frac{2\pi f x_o \rho d_e}{\mu} \quad (1)$$

$$St = \frac{d_e}{4\pi x_o} \quad (2)$$

where  $Re_o$  is the oscillatory Reynolds number,  $\rho$  is the fluid density,  $\mu$  is the fluid viscosity,  $f$  is the oscillation frequency,  $x_o$  is the center-to-peak oscillation amplitude and  $St$  is the Strouhal number.  $d_e$  is the effective tube diameter for OBRs with multi-orifice baffles [21]:

$$d_e = \sqrt{\frac{d^2}{n}} \quad (3)$$

where  $d$  is the tube diameter and  $n$  is the number of orifices in the baffle.  $Re_o$  describes the nature of the flow generated by the maximum oscillatory velocity  $2\pi f x_o$ . For  $Re_o < 250$ , the flow in the OBR is essentially axi-symmetrical and mixing intensity is low; for  $Re_o > 2000$ , the flow becomes turbulent; at intermediate values of  $Re_o$ , the flow is 3-dimensional and mixing is more intense than the laminar flow [22]. The Strouhal number ( $St$ ) is a measure of vortex propagation inside each inter-baffle zone relative to the tube diameter: larger oscillation amplitudes cause smaller  $St$  values and improve the vortex formation. Mixing and eddy propagation within the OBR is also inherently related to the inter-baffle spacing. For a given oscillation amplitude, the inter-baffle space should be large enough for vortices to expand and propagate. If the inter-baffle distance is too large, the vortices will not propagate through the full volume of the inter-baffle zone and produce stagnant regions [23]. Generally, the most adapted inter-baffle spacing is that which covers the maximum length of eddies without causing suppression or stagnation [23,24]. Several early studies on OBRs with single orifice baffles have investigated the effect of baffle spacing on single phase mixing quality using qualitative flow visualization [25,26]; and gas-liquid mass transfer [24]. The results of these studies indicate an 'optimal' baffle spacing of 1.5 and 1.8 times the tube diameter, although an optimization approach was not used in their experiments. A baffle-spacing of 1.5 times the tube diameter is now considered as a basic design rule for OBRs. Later, in 1999, Smith used this recommendation for the design of multi-orifice baffled reactors, whereby he replaced the tube diameter by the effective tube diameter as given in Eq. (3) [27].

Amongst the different studies on OBRs, several have focused on biodiesel and FAME production. Harvey et al. [20], evaluated the feasibility of a continuous OBR in the intensification of biodiesel production from rapeseed oil using single-orifice baffles in the presence of NaOH catalyst. Although no optimization process was done on the experimental factors (operating conditions or reactor geometry), it was found that the OBR allows methyl esters to be produced in much shorter

residence times than the traditional batch stirred tank. The study shows that a product with a cetane number of 45 at 50 °C in just 30 min. In another study, Phan et al. [28] used continuous mesoscale OBRs in the laminar flow regime for the screening process conditions. They also studied the effect of baffle design and found that the sharp edged helical baffle design significantly improves the mixing of immiscible oil and methanol phases in the laminar regime, compared with the single orifice baffled reactor. At 50 °C and after a residence time of 10 min, the authors obtained methyl ester yields in the range of 78–85% depending on the methanol-to-oil ratio. Mazubert et al. [29] studied the process intensification of biodiesel production from waste cooking oil in a continuous glass OBR for relatively low temperatures and a few different oscillation conditions. At low temperature (27 °C), the  $Re_o$  in the range of 28–42 does not have a significant effect on reaction yield, which is between 82.3 wt% and 87.3 wt%. However, for low amplitude oscillations (Strouhal number equal to 0.16), reaction conversion was greatly diminished (38.1 wt%). At the highest achievable temperature in the reactor 44 °C (due to limitations of the glass), 92.1 wt% conversion was obtained in 6 min for a methanol-to-oil of 6:1 and 1% KOH catalyst. Syam et al. [30] used a mechanistic approach to investigate the effect of different operating parameters (temperature, catalyst type, methanol-to-oil molar ratio) on biodiesel production from *Jatropha* oil in a pulsed loop reactor with annular baffles. The methanol to oil molar ratio of 6:1, the potassium hydroxide catalyst with the recommended amount of 1% (per oil weight), and the reaction temperature of 60 °C were suggested as optimal operating parameters. Under these conditions, the authors obtained 99% yield of methyl esters in 10 min.

In all of the above-mentioned studies, the effect of OBR baffle spacing on biodiesel synthesis has not been investigated. Indeed, in these experimental set-ups, the baffle spacing was fixed at the so-called optimal value that was determined visually many years ago [22,23,24]. The effects of oscillation frequency and amplitude on methyl ester production are also not entirely straightforward. The objectives of this study are therefore to explore the effects of oscillation frequency and baffle spacing on FAME yield (after 5 min of reaction time) in a temperature range 40–60 °C. To do this, we have used RSM for experimental design and then to model the system and find the optimal operating parameters amongst those studied.

## 2. Material and methods

### 2.1. Materials

Methanol of 99% purity and potassium hydroxide of 98% purity (Merck) were used in methoxide production. Ethyl acetate (Fluka) and BSTFA (Sigma-Aldrich) were used for gas chromatography (GC) sample preparation. The waste cooking oil (WCO) with <1% FFA, was obtained from the TMU University restaurant in Iran. Prior to the reaction, WCO was filtrated and preheated at 100 °C for about 3 h to vaporize its water content. The composition of WCO was determined by GC and is composed principally of oleic acid (32.9%wt), palmitic acid (30.4%wt) and linoleic acid (21.0%wt) with small amounts of stearic, linolenic and other fatty acids.

### 2.2. Experimental equipment

A vertical batch Oscillatory Baffled Reactor (OBR) with 0.06 m internal diameter and 0.55 m height and tri-orifice baffles (Fig. 1) following the dimensions given by Nogueira et al. [21] was fabricated in-house. The baffles had the capability of moving along the rod. The inter-baffle spacing,  $l$ , was varied between 0.05 m, 0.07 m and 0.09 m, corresponding to  $1.45d_e$ ,  $2d_e$  and  $2.6d_e$ , respectively. The multi-orifice baffle was chosen since multi-orifice baffles were initially designed for the scaling up of OBRs [27]. Indeed, this baffle type has shown to reproduce the fluid mechanics and axial dispersion, which are observed in lab-scale reactors, in larger scale equipment [31]. It is also expected to



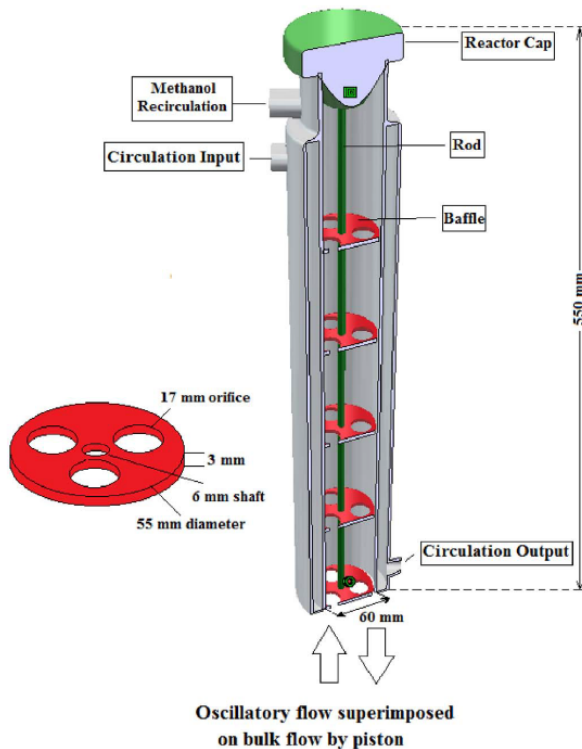


Fig. 1. Schematic view of a batch oscillatory baffled reactor.

be a good design for transesterification since this reaction is limited by mass transfer and the interfacial area can be created by high shear rates, which are produced at the edges of the baffle orifices [32].

The OBR experimental rig consists of the vertically positioned jacketed OBR with a glass condenser (to return the possible methanol vapors into the reactor), the oscillation generating mechanism, a heating and circulation unit and a control unit. The oscillation generating mechanism is a set of 0.37 kW electromotor, gearbox and a reciprocating piston in the cylinder. The heat and circulation unit consists of a tank equipped with a thermocouple and a hot oil pump to circulate the heating fluid in the outer jacket of the OBR. The control unit allows regulation of the oscillation frequency using the inverter and the temperature via two PT-100 sensors (one is situated inside the OBR and the other in the heating tank).

### 2.3. Experimental procedure

In each experimental run, the WCO oil and the methoxide (solution of KOH and methanol) were poured inside the OBR with a methanol to oil molar ratio of 6:1 and a catalyst concentration of 1%, which have shown to provide the best reaction conversion in a number of studies [7,29,30,33]. The reactor temperature (40 °C, 50 °C and 60 °C) was stabilized before the oscillation generation mechanism started. The oscillation amplitude,  $x_0$ , was set to 0.03 m, which corresponds to 0.3l to 0.6l depending on the baffle spacing. The oscillation frequency ranged from 2.4 to 4.9 Hz. These parameters provided oscillatory Reynolds numbers,  $Re_o$ , approximately in the range 2000 to 4000, corresponding to turbulent flow and a Strouhal number of 0.09.

### 2.4. Product analysis

After 5 min of reaction time, a sample was taken from the OBR sampling port and was quickly quenched using icy water. The FAME

and the glycerol were then separated using a centrifuge. Following this, about 50 mg of the FAME phase was poured into a micro-tube and 1 ml of internal standard solution for GC analysis (C17) with a concentration of 7 mg/ml was added. The samples were kept in a freezer at -5 °C to completely stop the reaction before the GC analysis. Approximately 0.5 µl of prepared solution were injected into the GC system. The Clarus 580 Gas Chromatography instrument (Perkin Elmer) was equipped with a flame ionization detector (FID) and biodiesel capillary column (Varian CP9080) with a length of 30 m, internal diameter of 0.32 mm and stationary phase thickness of 0.25 µm. Helium gas was used as the mobile phase. The column temperature program was adjusted according to the EN 14103 standard: the column temperature was firstly set at 60 °C for 2 min, the temperatures was then increased at a rate of 10 °C/min until 210 °C and then at a rate of 5 °C/min until 230 °C where it remained constant for 10 min. The total required time for the product analysis was 31 min. In order to calculate the mass of methyl esters and the FAME yield after 5 min of reaction time in batch mode, the following formula was used [34,35]:

$$W_{FAME} = \left( \sum A - A_{IS} \right) / A_{IS} \times \{ (C_{IS} \times V_{IS} \times M) / m \} \quad (4)$$

$$Y\% = (W_{FAME} \times M_{Oil}) / (W_{Oil} \times 3M_{FAME}) \times 100 \quad (5)$$

where  $W_{FAME}$  is the weight of methyl esters produced;  $A_{IS}$  is the peak area of the internal standard;  $V_{IS}$  is the volume of the internal standard solution (ml);  $M$  is the weight of biodiesel phase in the reaction mixture;  $M_{Oil}$  is the average molar weight of oil (g/mol);  $\sum A$  is the total area of peaks in the chromatogram;  $C_{IS}$  is the internal standard solution concentration (mg/ml);  $m$  is the weight of biodiesel for GC analysis;  $Y$  is the reaction yield percentage;  $W_{Oil}$  is the waste oil weight;  $M_{FAME}$  is the average molar weight (g/mol) of methyl esters produced.

### 2.5. Experimental design

Response surface methodology (RSM) is a collection of mathematical and statistical modeling techniques used for multiple regression analysis and to quantify the relationships between one or more measured responses and the vital input factors. There are typically two main purposes of considering a RSM model. Firstly, it can be employed to establish a relationship between independent operating parameters and a measured response that can then be used to predict the response for alternate values of the operating variables. Secondly, RSM can be used to determine the significance and the optimum settings of operating parameters that result in an optimum response over a predefined range of operating conditions. Another important advantage of using RSM is the fact that it decreases the number of required experiments for performance assessment in industrial applications [36]. There are however some limitations to RSM, like for many other modeling methods, including extrapolative prediction. A mechanistic modeling approach can provide some solutions [14,15], however, this may result in excessive experimental time and costs.

In this study, a 3-levels-3-factors Box-Behnken design was applied to evaluate the interaction of the independent variables, namely oscillation frequency, inter-baffle space and reaction temperature, in the OBR and their effects on the reaction yield of FAME. The Box-Behnken factorial design, including 12 factorial points and five center points, was applied for fitting a second-order response surface. The experimental runs were randomized to minimize the effects of unexpected errors in the observed responses. Moreover, five repeated center points were set to create uniform precision. Table 1 shows the encoded and physical levels of the independent variables used for the Box-Behnken experimental design and Table 2 tabulates the experimental runs performed and the resulting FAME yield for each run.

Using Design-Expert® Software (version 7), the least squares method was then used to suggest the best equation type to relate the experimental reaction yield to the operating variables.



**Table 1**  
The experimental matrix with the encoded and actual levels of independent variables.

Independent variables	Unit	Symbols	Levels of each factor		
			Coded values		
			–1	0	1
Oscillation frequency	Hz	$X_1$	2.4	3.7	4.9
Inter-baffle space	cm	$X_2$	5	7	9
Reaction temperature	°C	$X_3$	40	50	60

**Table 2**  
The Box-Behnken experimental design proposed by RSM.

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Response
Run	Frequency (Hz)	Space between baffles (m)	Reaction temperature (°C)	Conversion yield (%)
1	2.4	0.09	50	76.87
2	3.7	0.07	50	78.54
3	4.9	0.09	50	79.20
4	4.9	0.07	40	76.58
5	2.4	0.07	60	76.26
6	3.7	0.05	60	82.32
7	3.7	0.07	50	78.52
8	4.9	0.07	60	79.17
9	3.7	0.07	50	80.53
10	3.7	0.09	40	78.83
11	2.4	0.05	50	76.31
12	3.7	0.07	50	78.12
13	4.9	0.05	50	78.66
14	2.4	0.07	40	76.64
15	3.7	0.05	40	77.94
16	3.7	0.07	50	78.80
17	3.7	0.09	60	81.94

### 3. Results and discussion

#### 3.1. RSM model and statistical analysis

The polynomial quadratic model suggested by the Design-Expert® Software that based on analysis of variance (ANOVA) is given in Eq. (6) in terms of coded factors.

$$Y = +78.90 + 0.94 \times X_1 + 0.2 \times X_2 + 1.21 \times X_3 - 0.00475X_1X_2 + 0.74X_1X_3 - 0.32X_2X_3 - 2.12 \times X_1^2 + 0.98 \times X_2^2 + 0.38 \times X_3^2 \quad (6)$$

Where  $X_1$  is the oscillation frequency,  $X_2$  is the inter-baffle spacing and  $X_3$  is the reaction temperature. The probability value ( $p$ -value) of this model is 0.0286, which is considered statistically significant if a significance level of 0.05 is assumed. Table 3, shows the RSM model statistics the ANOVA analysis.

In this case,  $X_1$ ,  $X_3$ , and  $X_1^2$  are significant model terms. The model indicates that the effect of baffle-spacing is not that significant. The lack of fit  $F$ -value of 1.49 implies the Lack of fit is not significant relative to the pure error.

#### 3.2. Interaction of experimental operating parameters

##### 3.2.1. Oscillation frequency and inter-baffle spacing ( $X_1 \cdot X_2$ )

Fig. 2(a) shows the surface plot and design points indicating the interaction between oscillation frequency and inter-baffle spacing on the reaction yield when the reaction temperature is 60 °C. Fig. 2(b) is a two-dimensional contour plot showing the reaction yield as a function of the oscillation frequency ( $X_1$ ) and the inter-baffle spacing ( $X_2$ ). It can be seen from these plots that the reaction yield increases about 4% when the oscillation frequency increases from about 2 Hz to approximately 4 Hz ( $Re_o = 3312$ ), however, the inter-baffle space has little

effect on the yield. Indeed, increasing the oscillation frequency increases the Reynolds number, leading to higher turbulence and eddy/vortex formation. This increased turbulence will promote drop breakup and an increase in interfacial area, which in turn enhances mass transfer and reaction yield [37]. However, at oscillation frequencies above approximately 4.5 Hz, no significant increase in biodiesel yield was recorded. This issue is attributable to reversible feature and the equilibrium position of the transesterification reaction. In other words, the maximum reaction conversion will not be affected unless a new equilibrium position is attained. Syam et al. [30] have also reported similar results. According to Fig. 2(b), the symmetric shapes of contour lines indicates that the inter-baffle spacing does not have a significant effect on reaction yield. The statistical analysis of the model also confirms this result by providing a  $p$ -value of 0.6 for inter-baffle spacing and this is much  $> 0.05$ . This suggests that the inter-baffle spacing of tri-orifice baffles in this range with the oscillation amplitude of 0.03 m, does not have a significant effect on vortex formation and the reaction yield in biodiesel synthesis.

##### 3.2.2. Oscillation frequency and reaction temperature ( $X_1 \cdot X_3$ )

Fig. 3(a) and (b) show the surface plot with design points and the contour plot indicating the effect of the interaction of oscillation frequency and reaction temperature on reaction yield, respectively. According to these plots, it can be seen that the interaction of temperature and oscillation frequency has a non-negligible effect on methyl ester production, even though the  $p$ -value is  $> 0.05$ , which means that it is not that significant. At temperatures  $< 45$  °C, oscillation frequency hardly affects reaction yield and at oscillation frequencies less than about 3 Hz, the yield is hardly affected by temperature. The former observation is due to the kinetics of the reaction whilst the latter observation indicates that the reaction is hindered at low frequencies due to a lack of interfacial area between reactants. As both oscillation frequency and reaction temperature increase, higher yields are obtained, thereby showing a synergistic effect of the oscillation frequency  $X_1$  and temperature  $X_3$ .

##### 3.2.3. Inter-baffle spacing and reaction temperature ( $X_2 \cdot X_3$ )

Fig. 4(a) and (b) depict the interactive effects of inter-baffle spacing and reaction temperature on the reaction yield using surface and contour plots for a frequency of 3.7 Hz. The contour plot in Fig. 4(b) shows that there appears to be only a slight interaction between inter-baffle space and temperature. Indeed, for a fixed reaction temperature, an increase in inter-baffle space does not cause any significant change in reaction yield; the yield depends mostly on temperature. This is an interesting result since according to the original studies on 'optimal' baffle spacing, the recommended value is  $1.5d_c$ . In this study, the inter-baffle spacing varies between  $1.45d_c$  and  $2.6d_c$ , and there does not seem to be much impact on the process objective, i.e. the reaction yield, even though it can be noted that the highest yield is obtained at low values of baffle spacing close to  $1.5d_c$  (5 cm). The fact that no significant effect of baffle spacing was observed may be due to the fact that the flow regime is fully turbulent. It is expected that in fully turbulent conditions, small scale eddies are controlling the creation of interfacial area between reactants and therefore reaction yield and therefore the impact of inter-baffle spacing is attenuated. If the flow is not fully turbulent, the baffle spacing and oscillation amplitude have a greater effect on the propagation of vortices and mixing.

#### 3.3. Process optimization

The optimal level of each operating parameter that gave the maximum response factor (reaction yield after 5 min) was determined using the regression polynomial equation obtained from RSM model. The optimum values of operating parameters of methyl ester production reaction in the OBR setup are indicated in Fig. 5.

The optimum values for experimental variables were oscillation



Table 3  
Quadratic model statistics and ANOVA for RSM model.

Source	Std. Dev.	R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	Predicted R <sup>2</sup>	PRESS	
Linear	1.58	0.3701	0.2247	- 0.2403	64.17	
2FI	1.73	0.4206	0.0730	- 1.6515	137.18	
Quadratic	1.04	0.8549	0.6682	- 0.3310	68.86	
Cubic	0.94	0.9313	0.7253		+	Suggested Aliased

Source	Sum of squares	df	Mean-square	F-value	p-Value	
Model	44.23	9	4.91	4.58	0.0286	Significant
X <sub>1</sub> -frequency	7.09	1	7.09	6.61	0.0370	
X <sub>2</sub> -baffle spacing	0.32	1	0.32	0.30	0.6001	
X <sub>3</sub> -temperature	11.74	1	11.74	10.94	0.0130	
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	9.025E-005	1	9.025E-005	8.413E-005	0.9929	
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	2.21	1	2.21	2.06	0.1944	
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	0.40	1	0.40	0.38	0.5595	
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	18.89	1	18.89	17.61	0.0041	
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	4.02	1	4.02	3.74	0.0943	
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	0.60	1	0.60	0.56	0.4783	
Residual	7.51	7	1.07			
Lack of fit	3.96	3	1.32	1.49	0.3461	Not significant
Pure error	3.55	4	0.89			
Std. Dev.	1.04					
C.V. %	1.32					

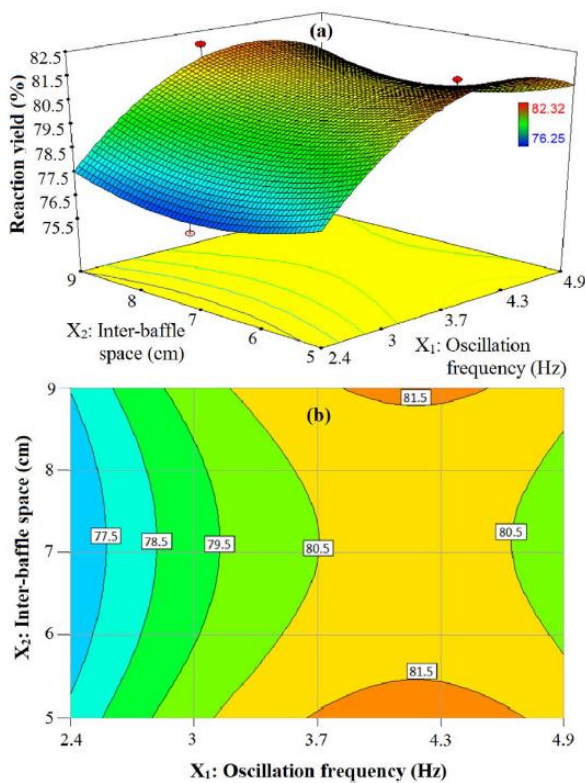


Fig. 2. Effect of interaction between oscillation frequency and inter-baffle space on reaction response (X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub>) when X<sub>3</sub> = 60 °C. (a) surface response; (b) contour plot.

frequency of 4.1 Hz, the inter-baffle spacing of 5 cm and a reaction temperature of 60 °C. Applying these optimum values, the reaction yield was predicted 81.9% with a desirability of 0.93. In order to confirm the predicted optimum values, they were applied in an experimental run and the reaction yield was measured as 82.0%. This proves excellent agreement of the RSM model with the experimental

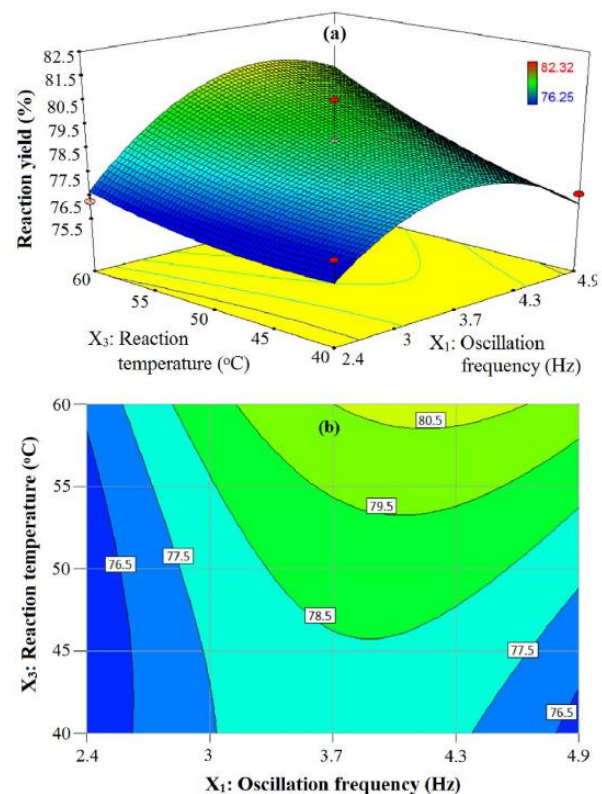


Fig. 3. Effect of interaction between oscillation frequency and reaction temperature on reaction yield (X<sub>1</sub>-X<sub>3</sub>) when X<sub>2</sub> = 5 cm. (a) surface response; (b) contour plot.

measurements. However, it is interesting to note that a reaction yield of 81.7% can be obtained for a baffle spacing of 9 cm, a frequency of 4.1 Hz and 60 °C. This again shows that the baffle spacing does not have a significant impact on reaction performance.

The optimal reaction yield was also determined by changing the



M.D. Soufi et al.

Fuel Processing Technology 167 (2017) 641–64.

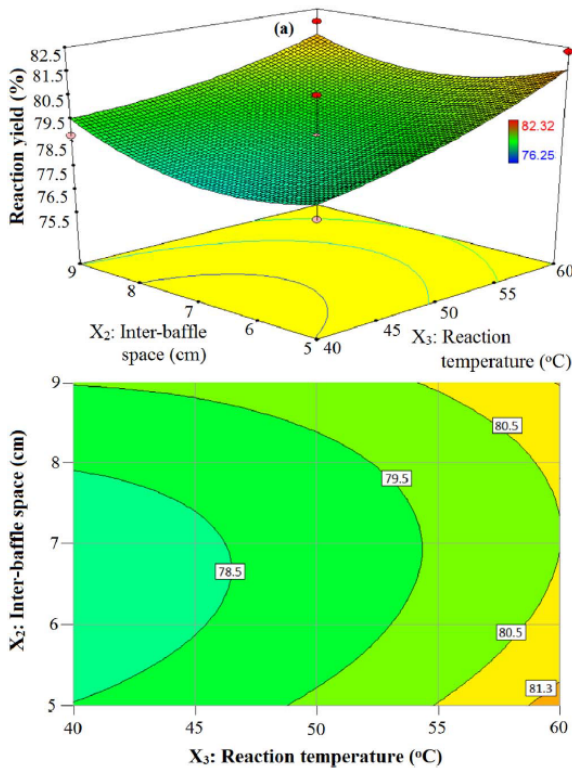


Fig. 4. Effect of interaction between inter-baffle space and reaction temperature on reaction response ( $X_2 \cdot X_3$ ) when  $X_1 = 3.7$  Hz. (a) surface response; (b) contour plot.

optimization criteria on the different operating parameters. If we consider a reduction in the global energy consumption of the process, one may want to find the maximal reaction yield for minimum reaction temperature and/or oscillation frequency. The maximum reaction yield obtained when both reaction temperature and oscillation frequency are minimized is 78.3% and it increases to 80.3% when only oscillation is minimized. For both of these results, the optimal oscillation frequency and inter-baffle spacing are 3.6 Hz and 7 cm, respectively. This again shows another value for inter-baffle spacing, thereby reinforcing the low impact of this parameter on FAME yield.

According to Likozar et al. [14], on the process economics of biodiesel production, the cost of operating at higher temperatures is much less important than the costs of feedstock and catalyst. Therefore, it appears that the best operating conditions for FAME production in the current system are approximately 4 Hz and a temperature of 60 °C, regardless of inter-baffle spacing.

#### 4. Conclusion

Response surface methodology successfully modeled and optimized biodiesel production in a batch oscillatory baffled reactor in turbulent flow. The RSM model was used to study the effects of oscillation frequency, inter-baffle spacing and reaction temperature and their interactions on the yield of methyl esters. The model suggested by RSM was a quadratic polynomial equation with a  $p$ -value of 0.0286.

It was found that the main parameter affecting reaction yield was temperature, but the interaction of temperature and oscillation frequency is also important. Indeed, if the frequency is too low, resulting in bad mixing, the temperature has very little impact on the reaction yield. However, the results show that it is not useful to use an oscillation frequency that is too high. After a certain limit, an increase in frequency no longer has a positive effect on the reaction. It is expected that this is due to the fact that interfacial area between the reactants has reached an equilibrium value and thereby resulting in no further improvement in reaction yield. The impact of inter-baffle spacing on reaction was found, however, to be very low. Although the optimum reaction yield was found for an inter-baffle spacing of 5 cm ( $1.45d_b$ ), an oscillation frequency of 4.1 Hz and 60 °C, similar reaction yields can be obtained at other values of the inter-baffle spacing. This result is different from the original recommendations of OBR design, which state that the best inter-baffle spacing is  $1.5d_b$ . Indeed, this widely accepted recommendation was obtained from qualitative flow visualization in single phase non-reactive flows in an OBR with single orifice baffles and it was directly applied to reactors with multi-orifice baffles with no further testing. The transesterification reaction studied here is a mass transfer limited liquid-liquid (multiphase) reaction that requires high interfacial area between reactants. The fact that inter-baffle spacing is not significant in this application suggests that the 'optimal' baffle spacing depends on the application and the process objective, which in the current case, the generation of interfacial area to enhance the reaction. The current study is also carried out in the turbulent flow regime and it appears that the turbulence alone is sufficient to generate the required interfacial area, therefore attenuating the effect of inter-baffle spacing, which in lower Reynolds number flows, is important for mixing and vortex propagation.

An optimum reaction yield of 81.9% after only 5 min was found for an inter-baffle spacing of 5 cm ( $1.45d_b$ ), an oscillation frequency of 4.1 Hz and 60 °C, which was confirmed by an independent experimental test. Nevertheless, since the inter-baffle spacing has a negligible impact, it appears that a range of operating conditions with a frequency of approximately 4 Hz and a temperature of 60 °C can allow similar reaction yield.

#### Acknowledgments

The authors express their thankful regards for Iranian National Science Foundation (INSF) (95822653) for their financial support. W

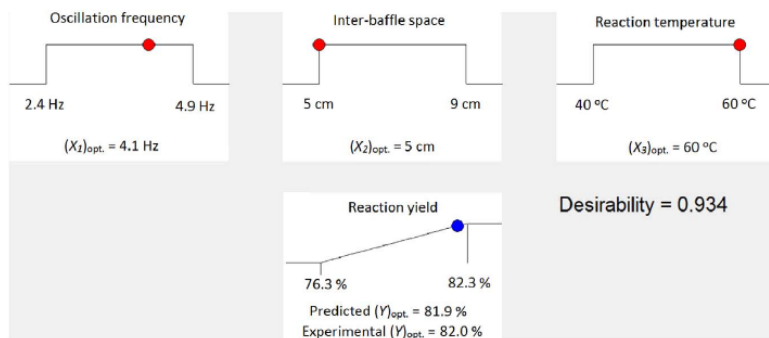


Fig. 5. The Optimal levels of the operating parameters.





also thank our colleagues from TMU Renewable Energies Research Institute who provided insight and expertise that greatly assisted this research.

## References

- [1] A. Molaei Dehkordi, M. Ghasemi, Transesterification of waste cooking oil to biodiesel using Ca and Zr mixed oxides as heterogeneous base catalysts, *Fuel Process. Technol.* 97 (2012) 45–51, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.01.010>.
- [2] G. Knothe, K.R. Steidley, A comparison of used cooking oils: a very heterogeneous feedstock for biodiesel, *Bioresour. Technol.* 100 (2009) 5796–5801, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.064>.
- [3] E. Wang, X. Ma, S. Tang, R. Yan, Y. Wang, W.W. Riley, M.J.T. Reaney, Synthesis and oxidative stability of trimethylolpropane fatty acid triester as a biolubricant base oil from waste cooking oil, *Biomass Bioenergy* 66 (2014) 371–378, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.022>.
- [4] M.D. Soufi, B. Ghobadian, G. Najafi, M. Sabzemaleki, F. Jaliliantabar, Performance and exhaust emissions of a SI two-stroke engine with biolubricants using artificial neural network, *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2015, pp. 3–9.
- [5] D. Sun, G. Sun, Y. Du, X. Zhu, T. Lu, Q. Pang, S. Shi, Z. Dai, Evaluation of optimized bio-asphalt containing high content waste cooking oil residues, *Fuel* 202 (2017) 529–540, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.069>.
- [6] Q.-Q. Zhang, B.-X. Cai, W.-J. Xu, H.-Z. Gang, J.-F. Liu, S.-Z. Yang, B.-Z. Mu, The rebirth of waste cooking oil to novel bio-based surfactants, *Sci Rep* 5 (2015) 9971, <http://dx.doi.org/10.1038/srep09971>.
- [7] A. Abbaszaadeh, B. Ghobadian, M.R. Omidkhan, G. Najafi, Current biodiesel production technologies: a comparative review, *Energy Convers. Manag.* 63 (2012) 138–148, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.02.027>.
- [8] G. Fogassy, N. Thegarid, G. Toussaint, A.C. van Veen, Y. Schuurman, C. Mirodatos, Biomass derived feedstock co-processing with vacuum gas oil for second-generation fuel production in FCC units, *Appl. Catal. B Environ.* 96 (2010) 476–485, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.03.008>.
- [9] H. Noureddini, D. Zhu, Kinetics of transesterification of soybean oil, *J. Am. Oil Chem. Soc.* 74 (1997) 1457–1463.
- [10] M. Busto, S.A. D'ippolito, J.C. Yori, M.E. Iturria, C.L. Pieck, J.M. Grau, C.R. Vera, Influence of the axial dispersion on the performance of tubular reactors during the noncatalytic supercritical transesterification of triglycerides, *Energy Fuel* 20 (2006) 2642–2647.
- [11] O.S. Stamenković, Z.B. Todorović, M.L. Lazić, V.B. Veljković, D.U. Skala, Kinetics of sunflower oil methanolysis at low temperatures, *Bioresour. Technol.* 99 (2008) 1131–1140.
- [12] G. Guan, M. Teshima, C. Sato, S. Mo Son, M. Faisal Irfan, K. Kusakabe, N. Ikeda, T. Lin, Two-phase flow behavior in microtube reactors during biodiesel production from waste cooking oil, *AIChE J.* 56 (2010) 1383–1390.
- [13] A.N. Phan, A.P. Harvey, Characterisation of mesoscale oscillatory helical baffled reactor-experimental approach, *Chem. Eng. J.* 180 (2012) 229–236, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2011.11.018>.
- [14] B. Likozar, A. Pohar, J. Levec, Transesterification of oil to biodiesel in a continuous tubular reactor with static mixers: Modelling reaction kinetics, mass transfer, scale-up and optimization considering fatty acid composition, *Fuel Process. Technol.* 142 (2016) 326–336, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.10.035> (Research article).
- [15] B. Likozar, J. Levec, Transesterification of canola, palm, peanut, soybean and sunflower oil with methanol, ethanol, isopropanol, butanol and tert-butanol to biodiesel: Modelling of chemical equilibrium, reaction kinetics and mass transfer based on fatty acid composition, *Appl. Energy* 123 (2014) 108–120, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.046>.
- [16] M.R. Mackley, X. Ni, Mixing and dispersion in a baffled tube for steady laminar and pulsatile flow, *Chem. Eng. Sci.* 46 (1991) 3139–3151, [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509\(91\)85017-R](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509(91)85017-R).
- [17] M.R. Mackley, X. Ni, Experimental fluid dispersion measurements in periodic baffled tube arrays, *Chem. Eng. Sci.* 48 (1993) 3293–3305, [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509\(93\)80213-A](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509(93)80213-A).
- [18] M. Palma, R. Giudici, Analysis of axial dispersion in an oscillatory-flow continuous reactor, *Chem. Eng. J.* 94 (2003) 189–198, [http://dx.doi.org/10.1016/S1385-8947\(03\)00057-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1385-8947(03)00057-3).
- [19] J.P. Solano, R. Herrero, S. Espín, A.N. Phan, A.P. Harvey, Numerical study of the flow pattern and heat transfer enhancement in oscillatory baffled reactors with helical coil inserts, *Chem. Eng. Res. Des.* 90 (2012) 732–742, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2012.03.017>.
- [20] A.P. Harvey, M.R. Mackley, T. Seliger, Process intensification of biodiesel production using a continuous oscillatory flow reactor, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 78 (2003) 338–341, <http://dx.doi.org/10.1002/jctb.782>.
- [21] X. Nogueira, B.J. Taylor, H. Gomez, I. Colominas, M.R. Mackley, Experimental and computational modeling of oscillatory flow within a baffled tube containing periodic-tri-orifice baffle geometries, *Comput. Chem. Eng.* 49 (2013) 1–17, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.09.015>.
- [22] P. Stonestreet, P.M.J. Van Der Veeken, The effects of oscillatory flow and bulk flow components on residence time distribution in baffled tube reactors, *Chem. Eng. Res. Des.* 77 (1999) 671–684.
- [23] M.S.R. Abbott, A.P. Harvey, G.V. Perez, M.K. Theodorou, Biological processing in oscillatory baffled reactors: operation, advantages and potential, *Interface Focus* 3 (2013) 20120036, <http://dx.doi.org/10.1098/rsfs.2012.0036>.
- [24] X. Ni, S. Gao, Mass transfer characteristics of a pilot pulsed baffled reactor, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 65 (1996) 65–71, [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199601\)65:1<65::AID-JCTB352>3.0.CO;2-1](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199601)65:1<65::AID-JCTB352>3.0.CO;2-1).
- [25] C.R. Brunold, J.C.B. Hunns, M.R. MACKLEY, J.W. THOMPSON, Losses for oscillatory, *Chem. Eng. Sci.* 44 (1989) 1227–1244.
- [26] P. Gough, X. Ni, K.C. Symes, Experimental flow visualisation in a modified pulsed baffled reactor, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 69 (1997) 321–328, [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199707\)69:3<321::AID-JCTB717>3.0.CO;2-Q](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199707)69:3<321::AID-JCTB717>3.0.CO;2-Q).
- [27] K.B. Smith, The Scale-Up of Oscillatory Flow Mixing, PhD Thesis, Univ. Cambridge, 1999, <https://core.ac.uk/download/pdf/1334175.pdf>.
- [28] A.N. Phan, A.P. Harvey, M. Rawcliffe, Continuous screening of base-catalysed biodiesel production using new designs of mesoscale oscillatory baffled reactors, *Fuel Process. Technol.* 92 (2011) 1560–1567, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.03.022>.
- [29] A. Mazubert, J. Aubin, S. Elgue, M. Poux, Intensification of waste cooking oil transformation by transesterification and esterification reactions in oscillatory baffled and microstructured reactors for biodiesel production, *Green Processes Synth.* 3 (2014) 419–429, <http://dx.doi.org/10.1515/gps-2014-0057>.
- [30] A.M. Syam, R. Yunus, T.I.M. Ghazi, T.S.Y. Choong, Synthesis of *Jatropha curcas* oil-based biodiesel in a pulsed loop reactor, *Ind. Crop. Prod.* 37 (2012) 514–519, <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.07.030>.
- [31] K.B. Smith, M.R. Mackley, An experimental investigation into the scale-up of oscillatory flow mixing in baffled tubes, *Chem. Eng. Res. Des.* 84 (2006) 1001–1011, <http://dx.doi.org/10.1205/cherd.05054>.
- [32] A. Mazubert, D.F. Fletcher, M. Poux, J. Aubin, Hydrodynamics and mixing in continuous oscillatory flow reactors—part I: effect of baffle geometry, *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 108 (2016) 78–92, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2016.07.015>.
- [33] M.G. Kulkarni, A.K. Dalai, Waste Cooking Oil is an Economical Source for Biodiesel: a Review, (2006), pp. 2901–2913.
- [34] L.T. Thanh, K. Okitsu, Y. Sadanaga, N. Takenaka, Y. Maeda, H. Bandow, Ultrasound-assisted production of biodiesel fuel from vegetable oils in a small scale circulation process, *Bioresour. Technol.* 101 (2010) 639–645, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.050>.
- [35] X. Yin, H. Ma, Q. You, Z. Wang, J. Chang, Comparison of four different enhancing methods for preparing biodiesel through transesterification of sunflower oil, *Appl. Energy* 91 (2012) 320–325, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.09.016>.
- [36] A.I. Khuri, S. Mukhopadhyay, Response surface methodology, Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat. 2 (2010) 128–149, <http://dx.doi.org/10.1002/wics.73>.
- [37] M.E. Mackay, M.R. Mackley, Y. Wang, Oscillations flow within tubes containing wall or central baffles, *Chem. Eng. Res. Des.* 69 (1991) 506–513.