تعیین مخلوط مناسب جهت افزایش تولید بیوگاز از ضایعات پسته و کود گاو

حسن درندی[۱*]، رحیم ابراهیمی[۲]، محمود محمودی اشکفتکی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲- عضو هئیت علمی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد

۳- دانشجوی دکتری رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد

* ایمیل نویسنده مسئول: h_dorondi@yahoo.com

چکیده

هدف از این تحقیق ارزیابی تولید گاز متان از ضایعات پسته می‌باشد. برای افزایش راندمان هضم فضولات گاوی نیز با ضایعات پسته مخلوط شد. نمونه ضایعات پسته از محل پایانه فراوری پسته در شهرستان بافق استان یزد جمع‌آوری شد. ابتدا آزمایشات اولیه بر روی هر دو ماده اصلی مورد آزمایش برای تعیین شاخص‌های مواد جامد کل، مواد جامد ماده خشک فرار و نسبت کربن به ازت انجام گرفت. جهت انجام آزمایش‌ها از هاضم‌های کوچک (بطری‌های با حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر) استفاده شد. آزمایش هضم بی‌هوازی در چهار سطح ضایعات پسته به کود گاوی R1=100:0، R2=75:25، R3=25:75 و R4=0:100، بر اساس وزن ماده خشک جامد با ۹٪ TSدر دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد در مدت ۲۸ روز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد در سطح ۷۵٪ کود گاوی و ۲۵٪ ضایعات پسته بیشترین مقدار گاز متان برحسب درصد LEL تولید شد. همچنین در این تیمار مقدار پتاسیم و فسفر از سایر تیمارها بالاتر بود.

واژه‌های کلیدی: بیوگاز، ضایعات، پسته، بهینه سازی، ویژگی‌های ضایعات

مقدمه

امروزه انرژی به عنوان یکی از مهم‌ترین مقوله‌های توسعه جوامع محسوب شده و کمبود آن در کشورهای مختلف سبب بروز نگرانی و در مواقعی باعث تنش‌های بین‌المللی شده است. این انرژی‌ها در دو رده انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم‌بندی شده‌اند (سلیمانی و جهانگیری، ۱۳۹۲). بحران‌های زیست محیطی جهان امروز، به‌گونه ای است که امروزه جایگزینی سوخت های فسیلی، مدیریت ضایعات و بهره‌گیری از شیوه‌های مناسب جهت دفع و بازیافت انواع پسماندها در اکثر کشورها، اعم از توسعه‌یافته یا در حال توسعه از اهمیت فراوانی برخوردار است (عادلی‌گیلانی و سوری، ۱۳۸۹). فرایند هضم بی‌هوازی یکی از تکنولوژی‌های قابل قبول، هم از نظر زیست‌محیطی و هم از نظر اقتصادی، برای تولید انرژی از ضایعات آلی می‌باشد که به عنوان یکی از گزینه-های اصلی درتأمین انرژی جایگزین در دنیا مطرح است (غلامی و همکاران، ۱۳۹۲).

ایران با تولید سالانه ۲۴۰۰۰۰ تن، بزرگ‌ترین کشور تولیدکننده پسته در جهان می‌باشد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴). پسته یکی از مهم‌ترین محصولات باغی کشور می‌باشد که در زمان فرآوری محصول، حجم ضایعات قابل ملاحظه‌ای را تولید می‌کند. مهم‌ترین محصولات فرعی پسته محصولات حاصل از پوست‌گیری میوه تازه پسته می‌باشد. این محصولات به‌طور عمده شامل پوسته سبز رویی، خوشه، برگ و مقادیر جزئی مغز و پوسته چوبی می‌باشد (Bohluli, 2006). با توجه به اینکه از هر سه کیلوگرم پسته تازه، یک کیلوگرم پسته خشک تولید می‌شود، دو کیلوگرم باری که در پایانه فراوری باقی می‌ماند، ضایعات پسته می‌باشد (شاکر اردکانی، ۱۳۸۶). این ضایعات اغلب با خاک مخلوط و به میزان کمتر به عنوان خوراک دام توسط دامداران محلی و یک بخش کوچک به عنوان داروی گیاهی و در غذای انسان (عمدتاً به عنوان مربای پوست پسته) استفاده می‌شود (Behgar *et al*., 2011). با توجه به مواد آلی و محتوای فنلی بالا و همچنین غلظت مواد جامد بالا، ضایعات پسته ناشی از پایانه‌های فراوری مشکلات زیادی را ایجاد می کند مگر این‌که به درستی مدیریت شود (Celik and Demirer, 2015). تکنولوژی هضم بی‌هوازی به‌طور گسترده در جهان به عنوان یکی از روش‌های مناسب مدیریت ضایعات آلی بکار گرفته می‌شود (Demirer *et al*, 2000; Amon *et al*, 2007; Balat and Balat, 2009). در ذیل به چندین مطالعه انجام شده در این زمینه می‌پردازیم.

ویتالی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ به منظور بررسی هضم بی‌هوازی موادی ازجمله تفاله‌های چغندرقند، دم و برگ چغندرقند، خمیر سیب‌زمینی، پوست سیب‌زمینی و پساب سیب‌زمینی آزمایش‌هایی را در دمای ۳۷/۵ درجه سانتی‌گراد در طول ۳۸-۲۸ روز انجام دادند. در این آزمایش همچنین تاثیر پیش فراوری با بخار بر عملکرد متان مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد تولید متان از تفاله چغندر قند و ضایعات آن (دم و برگ) ۴۳۰ و ۴۸۱ لیتر به ازای هر کیلوگرم ماده آلی و عملکرد تولید متان خمیر سیب‌زمینی، پوست سیب‌زمینی و آب سیب‌زمینی به ترتیب ۳۳۲، ۳۷۷ و ۳۲۳ لیتر به ازای هر کیلوگرم ماده آلی به‌دست آمد. روش پیش بخاردهی به‌طور معنی‌داری عملکرد تولید متان از خمیر سیب‌زمینی را تا مقدار ۳۷۳ لیتر افزایش داد.

ثنایی مقدم و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقی به بررسی پتانسیل تولید بیوگاز از ضایعات سیب‌زمینی که عمدتاً شامل پوست آن می باشد پرداخته‌اند. آن‌ها ضایعات سیب‌زمینی را با فضولات گاوی با نسبت ۸۰ به ۲۰ بر اساس وزن واحد فرار مخلوط کردند و میزان رطوبت مواد داخل هاضم بر اساس وجود کل مواد خشک به میزان ۷ درصد حجم کل تنظیم و زمان‌ماند مواد در داخل هاضم ۲۸ روز در نظر گرفته شد. بعد از جمع‌آوری گاز به‌صورت روزانه، مجموعاً ۱۶۰ لیتر بیوگاز از هر کیلو ماده جامد آلی دست آمد که حدود ۵۷/۶ آن‌را متان تشکیل می داد. غلامی و همکاران (۱۳۹۲) آزمایش هضم بی‌هوازی به‌طور اختصاصی بر روی هضم مشترک ضایعات زیتون و کود گاوی در چهار سطح ضایعات زیتون به کود گاوی، R1=10:90، R2=15:85، R3=20:80، R4=25:75، بر اساس وزن ماده خشک فرار در دو دمای ۳۷ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد و وزن کل مواد جامد خشک شده اولیه ۷٪ و PH اولیه برابر با ۶/۸ را مورد ارزیابی قرار دادند. بعد از گذشت ۲۸ روز ماند در دو دما در داخل هاضم برای هر یک از میانگین‌ها برای درصد تجمعی بیوگاز ۵۳، ۷۵، ۹۳ و ۱۲۷ لیتر بیوگاز در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد به ازای هر کیلو ماده خشک فرار جمع‌آوری گردید.

حسین‌زاده و همکارانش در سال ۱۳۹۳ پتانسیل تولید بیوگاز از ضایعات کاهو و کلم در هضم مشترک با کود گاوی را در سه سطح ۷۵٪ : ۲۵٪ و ۵۰٪ : ۵۰٪ و ۲۵٪ : ۷۵٪ (کود گاوی : کاهو و کلم) تحت آزمایش قرار دادند که بعد از گذشت ۳۰ روز هضم مواد در داخل هاضم، هر یک از تیمارها به ترتیب ۳۵۲/۷، ۲۵۶/۳ و ۲۰۹/۸ لیتر متان تولید کردند.

محمودی اشکفتکی و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی تأثیر ترکیبات مختلف فاضلاب شهری، فضولات گاوی و باقیمانده میوه و سبزیجات بر تولید بیوگاز/متان در دمای مزوفیلیک در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. آن‌ها تست‌های اولیه خود را در بطری های ۲۵۰ میلی‌لیتری انجام دادند و در آزمایش‌های خود عناصر مختلف موجود در سوبستراهای اولیه را استخراج و بررسی کردند و در ادامه از نتایج آزمایشی به‌دست آمده جهت طراحی یک هاضم جدید استفاده کردند. طراحی آن‌ها بر اساس دماهای مختلف، همزن با دورهای مختلف و ... بود. در طراحی صورت گرفته کلیه نیروهای وارد بر همزن و شافت آن بر اساس روابط ریاضی بررسی شد و نتایج حاصل از آن در نرم افزار Abacus به‌صورت المان محدود بررسی شد. لذا در راستای مدیریت مناسب حجم بالای ضایعات تولید شده در پایانه‌های فراوری پسته و استفاده بهینه از منابع انرژی، این پژوهش به امکان‌سنجی استحصال بیوگاز از این ضایعات (که تاکنون در کشور انجام نشده است) پرداخته است.

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری نمونه‌ها

نمونه‌های ضایعات پسته از محل یکی از پایانه‌های فراوری پسته در شهرستان بافق استان یزد جمع‌آوری گردید. این نمونه‌ها از واحد پوست‌گیری گرفته شد و پس از خشک شدن در معرض هوا به آزمایشگاه بیوگاز گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد انتقال یافت. نمونه‌گیری از کود گاوی نیز از محل گاوداری دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد انجام گرفت. نمونه‌ها مربوط به گاو شیری و به صورت تازه بوده و پس از نمونه‌گیری به همان آزمایشگاه منتقل شد. اینوکولوم از هاضم بی هوازی موجود در آزمایشگاه که مخلوطی از فاضلاب شهری و باقیمانده میوه و سبزیجات بود گرفته شد.

روند آزمایش

پیش ماده‌های استفاده شده جهت هضم همزمان و تولید بیوگاز شامل کود گاوی و ضایعات پسته بودند. قبل از بارگیری مواد در داخل بطری‌ها، کود دامی را از هرگونه سنگ‌ریزه و سایر مواد اضافی پاک‌سازی کرده، ضایعات پسته را نیز توسط دستگاه خردکن کاملاً آسیاب نموده و اینوکولوم نیز از صافی با منافظ به قطر ۱ میلی‌متر عبور داده شد. آماده سازی اولیه پیش ماده‌ها بر اساس وزن ماده خشک جامد به مقدار ۹٪ در نظر گرفته شد (هاضم باید حاوی ۷ تا ۹ درصد ماده خشک باشد) (غلامی و همکاران، ۱۳۹۲). برای رسیدن به رطوبت مطلوب به مواد آب و اینوکولوم (به نسبت ۲۵ : ۷۵) اضافه شد. سپس هر کدام از پیش ماده‌های رقیق شده، در آزمایشگاه با ظروف شیشه‌ای مخصوص بی‌هوازی شد (شکل ۱). برای این منظور از گاز نیتروژن ۹۹/۵٪ استفاده شد

(Fantozzi and Buratti, 2011). آزمایش هضم بی‌هوازی در چهار سطح ضایعات پسته به کود گاوی R1=100:0، R2=75:25، R3=25:75 و R4=0:100 و در سه تکرار بر اساس وزن ماده خشک جامد در نظر گرفته شد. جهت انجام آزمایش‌ها از هاضم‌های کوچک (بطری‌ها با حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر) در شرایط بی‌هوازی استفاده شد (محمودی اشکفتکی و همکاران، ۱۳۹۳).

نمونه‌های آماده شده به مدت ۲۸ روز در داخل انکوباتور در دمای ۳۷ درجه قرار گرفت. جهت به هم‌زدن مواد، بطری‌ها هر روز تکان داده می‌شدند و هر ۷ روز یک‌بار میزان متان تولیدی از هر کدام از هاضم‌ها اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری در هر بار تست مقدار ۵ میلی‌لیتر گاز با سرنگ به دستگاه گاز سنج تزریق شد.

شکل ۱- ظروف شیشه‌ای جهت بی‌هوازی سازی اولیه مواد

ساخت انکوباتور آزمایشگاهی

جهت نگهداری نمونه‌ها در شرایط دمای مزوفیلیک (۳۷ درجه سانتی‌گراد)، یک دستگاه انکوباتور آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد (شکل ۲). این دستگاه قابلیت کنترل دما از دمای محیط تا ۶۵ + درجه سانتی‌گراد و با دقت ۱ درجه سانتی‌گراد را به‌صورت خودکار دارا می‌باشد.

شکل ۲- انکوباتور ساخته شده به منظور کنترل دمای هاضم‌های تولید بیوگاز

ویژگی‌های پیش ماده‌ها

نسبت ازت به کربن: برای تعیین میزان کربن در هر یک از نمونه‌ها از روش استاندارد شماره ۱۳۳۲۰ سازمان تحقیقات و استاندارد ایران و میزان نیتروژن موجود در هر یک از مواد از روش کجلدال تعیین گردید. میزان ماده جامد خشک فرار (VS) و کل ماده خشک آلی (TS) مواد مورد آزمایش در دو مرحله و طبق استاندارد APHA2005 تعیین گردید. فسفر (P_2O_5) با استفاده از اسپکتوفتومتر مدل فارسیما LKB، پتاسیم (K_2O) با استفاده از فلیم فوتومتر مدل جن وی و pH با استفاده از دستگاه pH متر مدل نتروم ۶۹۱ و به روش‌های موجود در (Standard Method for the Examination of Water and Wastewater) اندازه‌گیری شدند.

گاز متان (CH_4) تولید شده با استفاده از دستگاه گاز سنج مدل GT-43 برند GMI اندازه گیری شد. این دستگاه توانایی اندازه-گیری CH_4 بر حسب ppm (ذرات در میلیون) ۰-۱۰۰۰۰، LEL (کمترین حد اشتعال) ٪ ۰-۱۰۰ و VOL (حجمی) ٪ ۰-۱۰۰ را در محدوده دمایی ۲۰- تا ۵۰ °C و رطوبت نسبی ۰ تا ۹۵٪ دارد.

نتایج و بحث

در جدول (۱) ترکیبات موجود در کود گاوی و ضایعات پسته مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ضایعات پسته دارای نسبت C به N بالایی است و این میزان نشان دهنده پتانسیل مناسب تولید بیوگاز از این ماده است.

جدول ۱- ترکیبات موجود در مواد اصلی آزمایش

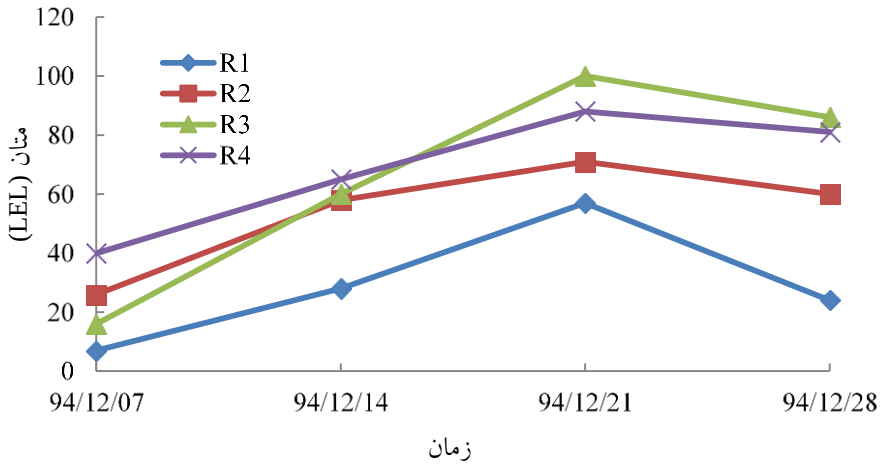
نوع ماده	C %	N %	TS %	VS %	C:N
ضایعات پسته	۳۷/۴۹	۱/۲۰۹	۹۵/۱	۸۲/۸	۳۱
کود گاوی	۲۵/۵	۱/۵	۴۴/۱	۵۵	۱۷
اینوکولوم	۰/۱	۰/۰۱	۰/۶	۹۹/۷	۱۰

پارامترهای دیگری از مواد نیز وجود دارند که بر میزان متان تولیدی اثرگذار هستند. بعضی از مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از میزان کربن آلی (C) ، نیتروژن کل (N)، pH، پتاسیم (K2O)، فسفر (P2O5) و غیره (Chen *et al.*, 2010; Chandra *et al.*, 2012; Al-Rousan and Zyadin, 2014). مقادیر این پارامترها و عناصر برای نمونه‌های مورد آزمایش بعد از هضم در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شمیایی اندازه‌گیری‌شده از ترکیبات مختلف ضایعات پسته و کود گاو و بعد از هضم

تیمار	C	N	TS	VS	P2O5	K2O	PH	C:N
	%	%	%	%	%	%		
R1	۴۴/۵۸	۱/۶۶	۶/۰۹	۲۶/۸۷	۰/۹۳	۱/۸۶	۵/۱۸	۲۶/۹
R2	۴۱/۰۹	۱/۷۸	۵/۵۶	۲۹/۹۷	۰/۸۲	۱/۵۵	۵/۳۵	۲۳/۱
R3	۳۱/۹۴	۲/۱۴	۵/۶۱	۵۵/۰۸	۱/۲۴	۲/۳۸	۷/۳۱	۱۴/۹
R4	۳۰/۴۳	۱/۳۸	۴/۹۲	۵۲/۴۸	۱/۱۶	۲/۳۶	۷/۱۹	۲۲/۱

شکل ۳ تغییرات میانگین متان موجود در بیوگاز تولید شده را نشان می‌دهد. طبق این جدول تولید متان از روز هفتم به بعد معنی‌دار شده و در روزهای بعد به حداکثر خود به میزان می‌رسد. همان‌طور که از شکل (۳) مشخص است تولید گاز متان بعد از هفته سوم رو به کاهش می‌باشد و تا پایان هفته چهارم ادامه دارد و در تیمار R1 بعد از هفته سوم تولید متان به شدت کاهش داشته و PH آن نیز طبق جدول (۲) به کمترین مقدار (۵/۱۸) رسیده که نشان دهنده محیط اسیدی می‌باشد. در تیمار R3 که طبق شکل (۳) بیشترین تولید متان را داشته است مقدار پتاسیم و فسفر اندازه گیری شده بالاترین مقدار در بین تیمارهای مورد آزمایش می‌باشد.



شکل ۳- متان موجود در بیوگاز تولید شده از هضم بی هوازی نمونه‌ها برای روزهای آزمایش

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق به تعیین مخلوط مناسب برای تولید بیوگاز از ضایعات پسته حاصل از پایانه‌های فراوری پسته در ترکیب با کود گاو پرداخته شد. بدین منظور ۴ ترکیب مختلف ضایعات پسته و کود گاو در شرایط بی‌هوازی در ۳ تکرار مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج

نشان داد مناسب‌ترین ترکیب ۷۵ : ۲۵ (کود گاو به ضایعات پسته) می‌باشد که متان تولید شده ۱۰۰٪ LEL در ۲۱ روز بعد از بارگذاری هاضم‌ها در شرایط مزوفیلیک به‌دست آمد.

منابع

احمدی. ک. قلی‌زاده. ح. ا. عباد زاده. ح. ر. حسین‌پور. ر. حاتمی. ف. رضایی. م. م. عرب. ح. کاظمی‌فرد. ر. عبدشاه. ه. فضلی استبرق. م. ۱۳۹۴. آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۳. جلد سوم. وزارت جهادکشاورزی، معاونت اقتصادی و برنامه‌ریزی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات. ۱۴۷صفحه.

ثنایی‌مقدم. ا. عاقل ح. آق‌خانی. م. ح. حدادخداپرست. م. ح. ۱۳۹۱. بررسی پتانسیل میزان تولید بیوگاز از ضایعات سیب‌زمینی به روش هضم بی‌هوازی. اولین همایش بین‌المللی و ششمین همایش ملی مدیریت پسماند. ۲ تا ۳ اردیبهشت‌ماه. مشهد.

حسین‌زاده. ی. صدرنیا. ح. عاقل. ح. ۱۳۹۳. بررسی پتانسیل تولید بیوگاز از ضایعات کاهو و کلم در هضم مشترک با کود گاوی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی. دانشگاه فردوسی مشهد. ایران

سلیمانی. ع. جهانگیری. م. ۱۳۹۲. بیوگاز، انرژی پایدار شهری. اولین همایش ملی جغرافیا، شهرسازی و توسعه پایدار. ۸ اسفندماه. دانشکده صنعت هوایی تهران.

شاکراردکانی. ا. ۱۳۸۶. راهکارهای استفاده از ضایعات فراوری پسته. ششمین کنفرانس اقتصاد کشاورزی ایران. دانشگاه فردوسی مشهد.

عادلی‌گیلانی. ا. سوری. ف. ۱۳۸۹. فناوری بیوگاز، گامی در راستای توسعه پایدار روستایی. نخستین همایش بیوانرژی ایران. ۲۱ مهرماه. تهران.

غلامی. م. خسرویار. س. هجری. ز. ۱۳۹۲. بررسی تولید بیوگاز تجمعی توسط ضایعات زیتون به‌همراه فضولات گاوی در دو دمای مزوفیلیک و ترموفیلیک بررسی حذف هیدروژن سولفید از بیوگاز با استفاده از فرایندهای بیولوژیکی. چهارمین همایش ملی بیو-انرژی ایران. ۹ آبان‌ماه. تهران

محمودی اشکفتکی. م. ابراهیمی. ر. قاسمی پیربلوطی. ع. خاکسار. ع. رهنما فلاورجانی. م. ۱۳۹۳. طراحی و آنالیز نیرویی یک هاضم با هم‌زن توربینی منحنی به روش ریاضی و المان محدود با نرم‌افزار آباکوس. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. شماره ۵. صفحات ۴۱ تا ۵۰.

Al-Rousan, A., and A. Zyadin. 2014. A technical experiment on biogas production from small-scale dairy farm. Journal of Sustainable Bioenergy Systems 4: 10–18.

APHA, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 6th edition. American Public Health Association, Washington DC, USA, p. 2005. Balat, M.

Amon, T., B. Amon, V. Kryvoruchko, W. Zollitsch, K. Mayer, L.Gruber, 2007. Biogas production from maize and dairy cattle manure – Influence of biomass composition on the methane yield. Agric. Ecosyst. Environ. 118, 173–182.

Balat, M., and H. Balat, 2009. Biogas as a renewable energy source – a Review. Energy Sources, Part A 31, 1280–1293.

Behgar M., S. Ghasemi, A. Naserian, A. Borzoie and H. Fatollahi, 2011. Gamma radiation effects on phenolics, antioxidants activity and in vitro digestion of pistachio (Pistachia vera) hull. Radiation Physics and Chemistry. 80: 963–967.

Bohluli ghaen, A. 2006. Chemical composition and digestability of pistachio by-products and their effects on Holstein cows' nutrition. MSc thesis, Animal Science Department, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Chandra, R., H. Takeuchi, T. Hasegawa, and R. Kumar. 2012. Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. Energy 43: 273–282.

Celik I. and G. N. Demirer, 2015. Biogas production from pistachio (Pistacia vera L.) processing waste. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology.

Chen, X., R. T. Romano, and R. Zhang. 2010. Anaerobic digestion of food wastes for biogas production. International Journal of Agriculture and Biology Engineering 3(4): 61–72.

Demirer, G.N., M. Duran, T. H. Ergüder, E. Güven, Ö.Ugurlu, U. Tezel, 2000. Anaerobic treatabilityand biogas productionpotential studies of different agroindustrial wastewaters in Turkey. Biodegradation 11, 401–405.

Fantozzi F. and C. Buratti, 2011. Anaerobic digestion of mechanically treated OFMSW: Experimental data on biogas/methane production and residues characterization. Bioresource Technology. 102: 8885-8892.

Vitaliy K., M. Andrea, B. Vitomir, A. Barbara and A. Thomas, 2009. Anaerobic digestion of by-products of sugar beet and starch potato processing. Biomass and Bioenergy 33: 620–62