Arch

4th International Conference on Agricultural Sciences Medicinal Plants and Traditional Medicine
CINVU
Kosar University
COMSTECH Inter-Islamic Network on Virtual Universities
KOSAR UNIVERSITY
September 20, 2021 Tbilisi - Georgia

# متغیرهای اثرگذار بر فرآیند تولید بیوگاز در راکتور ناپیوسته با روش برنامه نویسی خطی

**مهشید پورنظری[۱]، حامد رامیار [۲]، احسان خوش بیان[۳]**

۱ دانشجوی کارشناسی مهندسی محیط زیست ، موسسه آموزش عالی خردگرایان

۲ عضو هیئت علمی موسسه آموزش عالی خردگرایان

۳ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

## چکیده

هضم بی‌هوازی پسماند جامد فرآیندی است که علاوه بر اینکه یک روش مدیریت پسماند محسوب می‌شود، منجر به تولید انرژی نیز می‌شود. هضم با پسماند ترکیبی یک فرآیند بی‌هوازی محسوب می‌شود که از ترکیب ۲ پسماند مختلف با هدف بهتر کردن راندمان فرآیند هضم انجام می‌شود. همچنین باید از فرآیندهای اضافی اجتناب کنیم تا بیشترین تولید بیوگاز را داشته باشیم. بهینه‌سازی این فرآیند در مقالات مختلف با روش‌های گوناگون انجام گرفته است، در این مقاله با در نظر گرفتن ترکیب درصد هر پسماند و محدودیت‌های پیشنهادی و محدودیت‌های تئوری با توجه به مشخصات سوبسترا، متغییرهای تاثیرگذار بر هضم بی‌هوازی بهینه‌سازی شده است. روش برنامه‌نویسی خطی دقت مناسبی برای محاسبه گاز متان از پسماند-های ترکیبی دارد. برای رسیدن به حداکثر سوبسترا، ترکیب درصد پیشنهادی ذرت و کاه اضافه شده به کود گاوی باید حدود ۱۰ تا ۱۷٪ باشد. بالاترین مقدار تجزیه سوبسترا ۴۰۲ لیتر متان بر کیلوگرم COD می‌باشد که از ترکیب ۷۳٪ کود گاوداری و ۱۲٪ پسماند ذرت و ۱۵٪ کاه بدست می‌آید.

**کلمات کلیدی:** بهینه سازی، هضم بی‌هوازی، برنامه نویسی خطی، متان

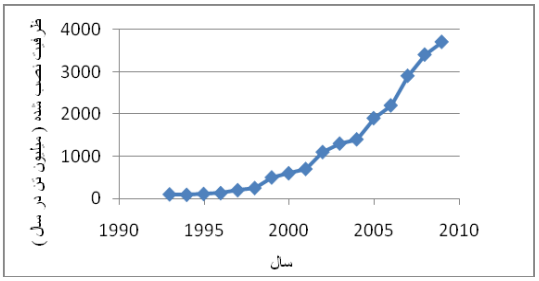
www.SID.ir

Arch

4th International Conference on Agricultural Sciences Medicinal Plants and Traditional Medicine
CINVU
Kosar University
COMSTECH Inter-Islamic Network on Virtual Universities
KOSAR UNIVERSITY
September 20, 2021 Tbilisi - Georgia

**مقدمه**

هضم بی‌هوازی معمولا در دهه گذشته در مناطق روستایی برای تولید بیوگاز جهت مصارف خانگی استفاده می‌شده است. بسیاری از روستاهای چین و هند از این فرایند بهره می‌برند. هضم بی‌هوازی یک فرایند بیولوژیکی است که در بسیاری از دستگاه‌های تصفیه فاضلاب برای تجزیه و پایدار کردن لجن مورد استفاده قرار می گیرد و همچنین فرایند بیولوژیکی اصلی در فرایند دفن در زمین می‌باشد. بسیاری از دامداری‌ها در آمریکا به استفاده از فرایند هضم بی‌هوازی به عنوان دستگاهی برای کاهش اثرات زیست محیطی فضولات دام‌ها و تولید متان به عنوان انرژی، روی آورده‌اند. در سطح بین‌المللی در دهه اخیر هضم بی‌هوازی در مناطق روستایی برای تولید بیوگاز جهت استفاده در پخت و پز و سوخت روشنایی مورد استفاده قرار گرفته است. تعداد بسیار زیادی از هاضم‌های بی‌هوازی در مقیاس خانگی در روستاهای چین و هند به کار گرفته شده‌اند. اخیرا در اروپا سیستم‌های بی‌هوازی مرکزی در مقیاس بسیار بزرگ برای مدیریت پسماند جامد شهری و تولید الکتریسیته احداث کرده است. سایر کشورهای توسعه یافته نیز مانند اروپا عمل کرده‌اند. تجزیه بیولوژیکی مواد آلی در طبیعت اساسا توسط باکتری‌های هوازی انجام می‌شود. نهایتا نتیجه اکسید شدن کامل مواد هیدروکربنی تولید دی‌اکسید کربن و آب است. تکنولوژی هضم بی‌هوازی پسماند جامد آلی از اروپا آغاز گشت و امروزه با ۱۲۰ واحد کامل عملیاتی سالانه حدود ۴ میلیون تن تولید دارد(خوش‌بیان و همکاران، ۱۳۹۱)، از نظر تولید بیوگاز در ابتدا کشور آلمان در صدر جدول است و سپس به ترتیب انگلستان، ایتالیا، اسپانیا، فرانسه، هلند، استرالیا و دانمارک کشورهای موفق در تولید بیوگاز هستند (سازمان انرژی های نو ایران، ۱۳۸۸). در (شکل ۱) ظرفیت تولید بیوگاز در ۲۰ سال اخیر اروپا آورده شده است (خوش‌بیان و همکاران، ۱۳۹۱)، (Chen, Y et al, 2008).




**شکل ۱- منحنی تولید بیوگاز در اروپا، ۱۹۹۰- ۲۰۱۰**

هضم با پسماند ترکیبی یک فرآیند بی‌هوازی محسوب می‌شود که از ترکیب ۲ پسماند مختلف با هدف بهتر کردن راندمان فرآیند هضم انجام می‌شود. همچنین باید از فرآیندهای اضافی اجتناب کنیم تا بیشترین تولید بیوگاز را داشته باشیم. اصلی-

www.SID.ir

Arch



ترین بخشی که در هضم پسماندهای ترکیبی مطرح می‌شود، تعادل چندین پارامتر اختلاط از قبیل ریز سنجی‌های[1] ماکرو و میکروسکپی، نسبت کربن به نیتروژن[2]، PH، اجزای سمی و بازدارنده[3] واکنش، مواد قابل تجزیه، مواد آلی و مواد خشک است (Hartmann, H et al, 2003). بهینه‌ترین مقدار کربن به نیتروژن و COD[4] به نیتروژن به ترتیب ۲۶ و ۷۴ است، این اعداد برای بهتر اجرا شدن فرآیند هضم بی‌هوازی پیشنهاد شده‌اند(Burton, C and Turner, C, 2003),(Mshandete, A et al, 2004) . به هر حال کمترین مقدار نرخ کربن به نیتروژن بین ۷ و ۱۰ گزارش شده، که برای پسماندهای غنی از نیتروژن مناسب است (Mshandete, A et al, 2004). آستانه محدودیت‌های آمونیاک آزاد و آمونیاک کل بین ۲.۱ و ۵ گرم نیتروژن بر لیتر گزارش شده که مربوط به پسماند ذرت و گاوداری است (Mshandete, A et al, 2004), (Gelegenis, J et al, 2007), (Cuetos, M.J et al, 2008), (Murto, M et al, 2004). هنگامی که مقدار زیادی ماده آلی بارگذاری می‌شود، برای جلوگیری از کاهش PH که توسط جمع شدن اسیدهای چرب فرار بوجود می‌آید خصلت قلیایی مورد نیاز است. هضم بی‌هوازی دربازه وسیعی از مقادیر قلیایت وابسته به سوبسترای استفاده شده عمل می‌کند، که این مقدار از ۲۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ میلی‌گرم کلسیم کربنات[5] به لیتر تغییر می‌کند (Mshandete, A et al, 2004), (Gelegenis, J et al, 2007), (Cuetos, M.J et al, 2008) , (Murto, M et al, 2004). پتانسیل متان مخصوص[6] در حدود ۱۴۸±۴۱ و ۳۵۶±۲۸ و ۲۷۵±۳۶ لیتر متان بر کیلوگرم VS[7] به ترتیب برای کودگاوداری، پسماند ذرت و کاه است. پتانسیل متان زایی پسماند به غلظت ۳ پارامتر اصلی از قبیل پروتئین، چربی، کربوهیدرات و مشخصات پارامترهایی که با آن متان بیشتری تولید می‌شود وابسته است (Gelegenis, J et al, 2007), (Maya-Altamira, L et al, 2008), (Neves, L et al, 2008) , (. Shanmugam, P and Horan, N.J, 2009) البته روش تئوری مناسب برای مشخص کردن پتانسیل متان وجود دارد، اما بیشتر فعالیت‌های انجام شده بر اساس مطالعات آزمایشگاهی بنا شده، تا بتواند خواص پسماندهای خام را توضیح دهد. ارزیابی این کار منجر به پیشرفت یک مدل مفید برای محاسبه نسبت سوبستراهای ترکیبی مربوط به فرآیند هضم یا سنتیک تولید متان می‌شود. برای این هدف روش بهینه سازی برنامه‌نویسی خطی[8] بر پایه محاسبه محدودیت‌ها، حداقل و حداکثر پارامترها در مورد چندین مشخصه از هاضم بی‌هوازی بکار برده شده است. برای شروع این روش از ۳ نوع پسماند با مشخصات گوناگون که عبارتند از کود گاوداری، پسماند ذرت و کاه به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته است.

---

[1] Nutrient
[2] C/N
[3] inhibitors/toxic compounds
[4] Chemical Oxygen Demand
[5] $CaCo_3$
[6] Specific methane potentials
[7] Volatile Solid
[8] Linear programming optimisation

www.SID.ir

Arch



## برنامه نویسی خطی

نرم افزارهای محاسباتی استفاده شده برای حل مسائل برنامه‌نویسی خطی از توانایی بسیار بالایی برخوردارند و برای آسان شدن حل مسائل از حل کننده اکسل[9] استفاده می‌شود. این روش شامل بیشینه کردن تابع هدف و شرح چندین محدودیت[10] است. در این جا ۲ تابع هدف مختلف مطرح می‌شود ۱- پتانسیل تجزیه بیولوژیکی سوبسترای کل لیتر متان به کیلوگرم جامد مرطوب از سوبسترا، ۲- راندمان سوبسترای تغییر شکل یافته و پتانسیل بیوسنتیکی، که در آن ظرفیت سنتیکی فرآیند هضم بی‌هوازی مشخص می‌شود (خوش بیان و همکاران، ۱۳۹۱) . برای محاسبه پتانسیل تئوری تجزیه بیولوژیکی از مقدار COD پسماندهای مختلف استفاده شده و با استفاده از فاکتور ۴۱۰ لیتر متان بر کیلوگرم COD از بین رفته محاسبه می‌شود (Angelidaki, I and Sanders, W, 2004) . پتانسیل بیوسنتیکی تئوری به وسیله مقدارهای ۳۵ لیتر متان بر کیلوگرم چربی در روز و ۴۲ لیتر متان بر کیلوگرم پروتئین در روز و ۲۷ لیتر متان بر کیلوگرم کربوهیدرات در روز (Neves, L et al, 2008) . حداقل و حداکثر میزان این پارامترها توسط غلظت COD/N و غلظت آمونیوم[11] به نیتروژن و محدودیت‌های این سیستم از قبیل غلظت چربی، قلیاییت کل، جز مایع، $COD/SO^{4-2}$ و با فرض این که هضم پروتئین کامل انجام شود مشخص می‌شود. خلاصه روش برنامه نویسی خطی استفاده شده در این مطالعه به شکل زیر است:۱- ورود محدودیت‌های پیشنهادی. ۲- محاسبه مقدار محدودیت‌های تئوری با توجه به خصوصیات سوبسترا. ۳- محاسبه اجزای هر پسماند برای تنظیم آمیختن، که دارای محدودیت‌های پیشنهادی و حداکثر کردن متان تولیدی است.

## روش محاسبه راکتور ناپیوسته

از یک راکتور ناپیوسته ۶ لیتری که در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد با دور همزن ۱۲۰ استفاده شده است. خوراک استفاده شده در این راکتور مخلوطی از پسماند ذرت، کاه و کود گاوداری است، این ۳ پسماند را با نسبت‌های مشخص باهم ترکیب کرده و ۳ مخلوط مختلف A، B و C را ساخته‌ایم ترکیب درصد این۳ مخلوط همراه باخواص هر کدام به ترتیب در جداول شماره ۱، ۲ و ۳ آورده شده است.

[9] Excel Solver
[10] Restriction
[11] $NH_4^+$

www.SID.ir

Arch

4th International Conference on Agricultural Sciences Medicinal Plants and Traditional Medicine
CINVU
Kosar University
COMSTECH Inter-Islamic Network on Virtual Universities
KOSAR UNIVERSITY
September 20, 2021 Tbilisi - Georgia

**جدول ۱- ترکیب درصد A**

| پتانسیل تئوری | درصد پسماند | محدودیت ورودی | محدودیت اصلی | مخلوط |
|---|---|---|---|---|
| ۵۰ | کود گاوداری (۹۰) | ۴۵/۳ | COD/N ۵۰ – ۱۰۰ | A |
| | پسماند ذرت (۰) | /۳ | $NH_4^+$-N ۰/۲ – ۳/۵ | |
| | کاه (۱۰) | ۶/۲ | LIP ۰/۵ – ۸/۳ | |

**جدول ۲- ترکیب درصد B**

| پتانسیل تئوری | درصد پسماند | محدودیت ورودی | محدودیت اصلی | مخلوط |
|---|---|---|---|---|
| ۷۱ | کود گاوداری (۸۳) | ۹۸ | COD/N ۵۰ – ۱۰۰ | B |
| | پسماند ذرت (۰) | ۳/۳ | NH4+-N ۰/۲ – ۳/۵ | |
| | کاه (۱۷) | ۱۵ | LIP ۰/۵ – ۱۷ | |

**جدول ۳- ترکیب درصد C**

| پتانسیل تئوری | درصد پسماند | محدودیت ورودی | محدودیت اصلی | مخلوط |
|---|---|---|---|---|
| ۱۱۹ | کود گاوداری (۷۵) | ۸۶ | COD/N ۵۰ – ۸۰ | c |
| | پسماند ذرت (۸) | ۷/۵ | NH4+-N ۰/۲ – ۳/۵ | |
| | کاه (۱۹) | ۲۲/۳ | LIP ۰/۵ – ۲۱ | |

## محاسبات

مقدار مول متان توسط رابطه گاز ایده‌آل از رابطه زیرمحاسبه می‌شود [۱].

$$CH_4 \text{ mole} = ( P_T \, XCH_4 \, VGas )/( R \, (T+273))$$

www.SID.ir

Arch



که در آن $P_T$ فشار کل، $XCH_4$ درصد مولی متان، $V_{Gas}$ حجم گاز، R ثابت گاز ایده‌آل ۳۶۴/۶۲ میلی‌متر جیوه در میلی-گرم بر مول درجه کلوین و T دمای راکتور ۳۵ درجه سانتی‌گراد است. نتایج بدست آمده از بکارگیری روش LP در این مقاله در جداول شماره ۱، ۲، ۳ و ۵ آورده شده است. با توجه به ترکیب درصد هر یک از پسماندها که در جدول شماره ۴ آمده ۳ ترکیب مختلف A، B و C با خواص مشخص و اعمال محدودیت‌های موردنظر به وجود آمده‌اند. جداول شماره ۱، ۲ و ۳ سهم هر کدام از پسماندها در ترکیبات A، B و C که توسط مدل برنامه‌ریزی خطی مدل LP را نشان می‌دهد و جدول شماره ۵ خواص مخلوط و میزان تجزیه بیولوژیکی برای هر کدام از ترکیبات را نشان می‌دهد.

**جدول ٤- ترکیب درصد پسماندها**

| کاه | پسماند ذرت | کود گاوداری | متغییر |
|---|---|---|---|
| ۲۵/۲ | ۴۳ | ۹۱/۴ | (٪) جز مایع |
| --- | ۵/۸ | ۸/۲ | PH |
| ۹۲/۸ | ۲۱/۶ | ۳۳/۶ | جز قابل حل (ms/cm) |
| ۰/۲ | ۰/۷ | ۱/۱ | دانسیته (Kg WW/L) |
| ۱۲۰ | ۱/۳ | ۱۷/۵ | TS (g TS/Kg WW) |
| ۵۱/۱ | ./۱ | ۱۱/۹ | VS (g SV/Kg WW) |
| ۶/۹ | ۵۱/۹ | ۲۳/۹ | COD (g O2/Kg WW) |
| ۱۲۵ | ۴۴ | ۱۴/۳ | COD حل شده (g O2/Kg WW) |
| ۲۰۰ | ۵/۹ | ۸/۹ | خصلت قلیایی (g CaCO3/L) |
| ۰/۳ | ۰/۲ | ۰/۳ | کلراید (g/kg WW) |
| --- | --- | ۰/۰۵ | سولفات (g/kg WW) |
| ۵۵/۸ | ۶/۲ | ۲/۸ | پروتئین (g Pr./Kg WW) |
| ۲۵/۳ | ۲۲/۳ | ۲/۸ | چربی (g Lip./Kg WW) |
| ۶۰ | ۵۴۸/۴ | ۷/۹ | کربوهیدرات (g Carb./Kg WW) |
| ۷۹/۴ | ۵۱۱ | ۸/۹ | COD/N ratio |

www.SID.ir

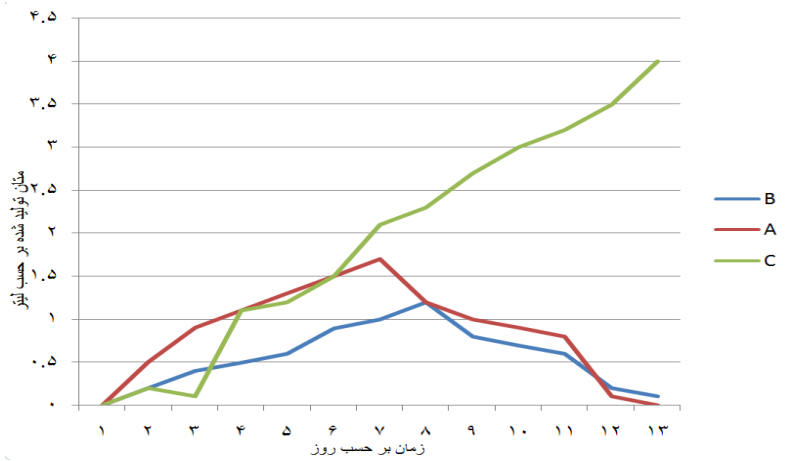
Arch



**جدول ۵- میزان تجزیه بیولوژیکی برای هر ترکیب بدست آمده از روش (LP)**

| ترکیب | مقدار تئوری متان- COD (گرم بر لیتر) | مقدار تئوری تولید متان لیتر متان بر کیلوگرم COD | مقدار تئوری تولید متان لیتر متان بر کیلوگرم WW |
|---|---|---|---|
| A | ۵/۲ | ۵۱۲ | ۶۱ |
| B | ۷/۳ | ۴۱۰ | ۸۱ |
| C | ۶/۹ | ۴۱۰ | ۱۱۵ |

در مخلوط A محدودیت حداکثر غلظت چربی که ۴ و ۹ گرم بر لیتر است، که حداکثر متان تولید شده را محدود می‌کند. مخلوط B با افزایش محدودیت غلظت چربی تهیه شده است، بنابراین میزان تجزیه پذیری بالاتری نسبت به ترکیب A دارد. در مخلوط سوم C محدودیت‌های غلظت چربی بیشتر افزایش یافته و به ۲۱ گرم بر لیتر رسیده است. در (شکل ۲) تولید متان بر اساس تجزیه کل سوبسترای مصرفی آورده شده است.



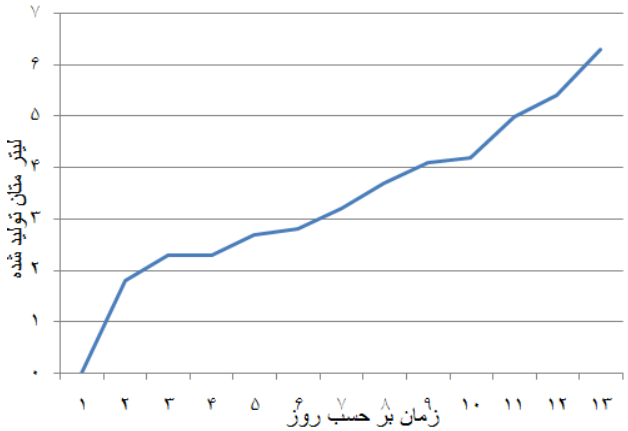

شکل ۲- **متان تولید شده بر حسب تجزیه سوبسترا $CH_4$ – COD (g/l)**

و در (شکل ۳) تولید متان، بر اساس تجزیه کل سوبسترای مصرفی که توسط روش برنامه نویسی خطی بهینه شده آورده شده است.

www.SID.ir

Arch






شکل ۳- **متان تولید شده با روش برنامه نویسی خطی بر حسب تجزیه سوبسترا $CH_4$ – COD (g/l)**

## نتیجه‌گیری

برنامه‌نویسی خطی LP یک روش مفید و همچنین با کاربرد آسان برای محاسبه متان تولیدی در هضم بی‌هوازی خوراک-های مختلف است.

درصد مواد آلی، نوع خوراک ورودی و سازش ماده تلقیح می‌توانند بر روی تولید متان و تجزیه سوبسترا تاثیر گذارند.

ترکیب درصد پیشنهادی پسماند پهن گاوی و پسماند ذرت و کاه برای رسیدن به بهترین خوراک باید حدود ۷۲٪ کود گاوداری و ۱۷٪ پسماند ذرت و ۱۱٪ کاه باشد.

www.SID.ir

Arch



## منابع

۱. خوش‌بیان، احسان؛ قهرمانی، حسین؛ علی‌آبادی، مجید؛ یغمایی، سهیلا؛ بهینه سازی فرآیند هضم بی‌هوازی پسماند جامد با روش برنامه نویسی خطی، مجموعه مقالات اولین همایش ملی کاربرد سیستم‌های هوشمد، دانشگاه آزاد واحد قوچان، قوچان، ۱۴-۱۵ اسفند ماه ۱۳۹۱.

۲. سازمان انرژی های نو ایران،(۱۳۸۸)؛ «تولید انرژی و کود از فضولات دامی ، فرصت‌های جدید»،وزارت جهاد کشاورزی ، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج .

3. Murto, M., Björnsson, L., Mattiasson, B., 2004. Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. J. Environ. Manage. 70, 101–107.

4. Hartmann, H., Angelidaki, I., Arhing, B.K., 2003. Co-digestion of the organic fraction of municipal waste with other waste types. In: Mata-Alvarez, J. (Ed.), Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. IWA Publishing, UK.

5. Burton, C., Turner, C., 2003. Manure Management. Silsoe Research Institute. pp281–282.

6. Chen, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S., 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. Bioresour. Technol. 99, 4044–4064.

7. Mshandete, A., Kivaisi, A., Rubindamayugi, M., Mattiasson, B., 2004. Anaerobic batch co-digestion of sisal pulp and fish wastes. Bioresour. Technol. 95, 19–24.

8. Hansen, K.H., Angelidaki, I., Ahring, B.K., 1998. Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia. Water Res. 38, 5–12.

9. Angelidaki, I., Ahring, B., 1993. Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: effect of ammonia. Appl. Microbiol. Biotechnol. 38, 560–564.

10. Cuetos, M.J., Gómez, X., Otero, M., Morán, A., 2008. Anaerobic digestión of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). J. Biochem. Eng. 40, 99–106.

11. Gelegenis, J., Georgakakis, D., Angelidaki, I., Christopoulou, N., Goumenaki, M., 2007b. Optimization of biogas production from olive-oil mill wastewater, by codigesting with diluted poultry-manure. Appl. Energy 84, 646–663.

12. Maya-Altamira, L., Baun, A., Angelidaki, I., Schmidt, J.E., 2008. Influence of wastewater characteristics on methane potential in food-processing industry wastewaters. Water Res. 42, 2195–2203.

13. Neves, L., Gonçalo, R., Oliveira, R., Alves, M.M., 2008. Influence of composition on the biomethanation potential of restaurant waste at mesophilic temperatures. Waste Manage. 28, 965–972.

14. Shanmugam, P., Horan, N.J., 2009. Simple and rapid methods to evaluate methane potential and biomass yield for a range of mixed solid wastes. Bioresour. Technol. 100, 471–474.

15. Angelidaki, I., Sanders, W., 2004. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. Rev. Environ. Sci. Bio/Technol. 3, 117–129.

16.Zhang,Ruihong,Jenkins,Bryan M,Williams,Robert B.(2008);«Current-Anaerobic-Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste»,California Integrated Waste Management Board,California Environmental Protection Agency.

www.SID.ir