

آنالیز حرارتی و تامین گرمایش هاضم بیهوازی مزوفیلیک با خوراک کود گاوی

رضا رفیعی نژاد^۱، علیرضا نورپور^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: noorpoor@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۰

چکیده

در این پژوهش، هدف تعیین میزان گرمایش لازم برای ایجاد شرایط مطلوب برای هضم بیهوازی خوراک کود گاوی در هاضم بیهوازی دامداری ملارد است. ابتدا باتوجه به فیزیک هاضم، اتلاف حرارتی آن در نرم افزار ای.ای.اس محاسبه شد. سپس باتوجه به خواص کود گاوی و حرارت لازم برای بالا بردن دما خوراک ورودی به دمای مزوفیلیک و تثبیت این شرایط در داخل هاضم، حرارت لازم محاسبه شد. همچنین برای گرمایش هاضم بیهوازی از سیستم کلکتور خورشیدی و دیگ آب گرم در نرم افزار ترنسیس استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد که بیشترین اتلاف حرارت در سقف هاضم صورت می گیرد که با افزایش ضخامت آن از هدر رفتن مقدار قابل توجهی از انرژی، جلوگیری خواهد شد. استفاده از سیستم خورشیدی نسبت به سیستم دیگ آب گرم به صورت مجزا تا حدود ۲۸٪ از مصرف سوخت گاز متان برای تولید آب گرم را کاهش می دهد و نیز استفاده از تانک ذخیره آب گرم در سیستم خورشیدی حدود ۱۸٪ از مصرف سوخت سیستم کمکی در کل سال را کاهش خواهد داد.

کلمات کلیدی

هاضم بیهوازی، مزوفیلیک، انتقال حرارت، کود گاوی، سیستم خورشیدی

Thermal Analysis and Supply of Heating of Mesophilic Anaerobic Digester with Cattle Manure Feed

Reza Rafieenezhad¹, Alireza Noorpoor^{2*}

1. School of Environment, Colleague of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*2. School of Environment, Colleague of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*Email Address: noorpoor@ut.ac.ir

Abstract

In this research, the aim is to determine the amount of heating necessary to create favorable conditions for the anaerobic digestion of cattle manure in Anaerobic digestion of Malard stockyard. First, due to the digester physics, the heat loss was calculated in EES software. Then, due to the properties of the cattle manure and the required heat to increase the feed temperature to the mesophilic temperature and the stabilization of these conditions within the digester, the required heat was calculated. Also, for heating of anaerobic digester, the solar collector system and hot water boiler were evaluated in the Transys software. The results of the study showed that the highest heat loss occurs at the ceiling of the digester, which by increasing its thickness, will prevent a significant amount of energy loss. The using of the solar system in relation to the hot water boiler system separately reduces to 28% of the methane consumption of gas for the production of water. Also using the hot water storage tank in the solar system will reduce about 18% of the gas consumption of the total auxiliary system use throughout the year.

Keywords

Anaerobic digester, Mesophilic, Heat transfer, Cattle manure, Solar system.

۱- مقدمه

ترموفیلیک^۶ وجود دارد، که هرکدام از این نوع باکتری‌ها در محدوده دمای ثابتی فعالیت دارند. در این میان باکتری سایکروفیلیک در محدوده دمای بین 0°C تا 20°C با دمای بهینه کارکرد 15°C ، باکتری مزوفیلیک در محدوده دمای بین 0°C تا 45°C با دمای بهینه کارکرد 35°C و باکتری ترموفیلیک در محدوده دمای بین 45°C تا 65°C با دمای بهینه کارکرد 50°C تا 60°C بیشترین بازده را در محدوده دمای بهینه دارند [۴]. انرژی لازم برای گرمایش هاضم، تابع مقدار حرارت مورد نیاز برای رسیدن دمای خوراک ورودی به دمای عملیاتی هاضم و همچنین مقدار انرژی مورد نیاز برای ثابت نگه داشتن دمای عملیاتی هاضم برای زنده نگه داشتن میکروارگانیسم‌ها و پایداری آن است. یک هاضم بیهوازی با توجه به شرایط آب و هوای محل، شرایط دمای کارکرد هاضم و جنس مواد به کار رفته در ساخت دیواره و بدنه، سیستم گرمایشی برای هاضم بیهوازی در نظر می‌گیرند. هاشیمیتو و همکارانش با انجام آزمایش نشان دادند که، دفع حرارت از هاضم شامل اتلاف حرارتی از سقف و بدنه هاضم، انتقال حرارت از کف هاضم با خاک اطراف آن، تبخیر در هاضم و دمای بالای بیوگاز خروجی و بالا بردن دمای خوراک ورودی به هاضم می‌باشد [۵]. بنابراین اتلاف حرارت به محیط باید توسط سیستم‌های گرمایشی جبران شود که بر این اساس مقدار انرژی لازم برای ثابت نگه داشتن دمای عملیاتی یک هاضم بیهوازی محاسبه خواهد شد. هدف از این پژوهش، تعیین گرمایش لازم برای ایجاد شرایط مطلوب برای تولید بیوگاز از هاضم بیهوازی مزوفیلیک دامداری ملارد است. ابتدا به باتوجه به روابط و معادلات حاکم بر هاضم به شبیه‌سازی آن در نرم افزار ای.ای.اس^۷ پرداخته شده است. سپس برای تأمین گرمایش از کوئل‌های گرمایش از طریق شبیه سازی سیستم کلکتور خورشیدی و دیگ آب گرم در نرم افزار ترنسسیس^۸ استفاده شده است. در ادامه به منظور مقایسه نتایج، نمودارهای تحلیلی ترسیم شده است.

۲- هاضم ملارد

هاضم بیهوازی ملارد محفظه‌ای استوانه‌ای است که در مرکز این استوانه ستونی مربعی شکل وجود دارد. دیوار، کف و ستون قرار گرفته در مرکز آن از جنس بتن ساخته شده‌اند. سقف هاضم نیز به صورت خیمه‌ای و از ضلع بالایی استوانه به میزان ۱ متر فاصله دارد. مواد و مصالح به کار رفته، ابعاد فیزیکی در ساخت دیوار، کف و سقف هاضم در جدول زیر آمده است.

جدول ۱- مصالح استفاده شده در ساخت هاضم

نوع	مصالح (مقدار)
دیوار	بتن (۵۰cm)
کف	بتن (۵۰cm)
سقف	پی.وی.سی ^۹ (۳mm)
لوله‌های گرمایش	پکس ^{۱۰} (۲۰mm)

انرژی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل اقتصادی، زیست محیطی در جهان مطرح است که توسعه دنیای امروز به آن وابسته می‌باشد. در حال حاضر عمده تأمین انرژی از طریق سوخت‌های فسیلی صورت می‌گیرد. استفاده مداوم از سوخت‌های فسیلی با نرخ فعلی سبب گرم شدن کره زمین و بروز تغییرات شدید آب و هوایی خواهد شد. از طرفی پیش‌بینی می‌شود در سال‌های نه چندان دور این منابع به پایان برسند، تأمین انرژی‌های جایگزین و تجدیدپذیر^۱ با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای^۲ و صیانت از منابع ملی از اولویت‌های اصلی اغلب کشورها از جمله ایران است، در این میان تولید بیوگاز از هاضم بیهوازی^۳ یکی از زمینه‌های دارای پتانسیل قابل ملاحظه بشمار می‌رود [۱]. هاضم بیهوازی به عنوان یکی از راهکاری جلوگیری از ورود مستقیم پساب‌های دامی، شهری، کشاورزی و صنعتی به محیط زیست تلقی می‌شود. با توجه به حجم زیاد مواد زائد تولیدی و مشکلات زیست محیطی حاصل از پساب‌ها، ضرورت دارد که این مواد قبل از ورود به محیط زیست به طریق مناسبی تصفیه گردند. هاضم بیهوازی ضمن کاهش شدید بار آلودگی مواد زائد آلی، منجر به تولید انرژی باارزشی نیز خواهد شد. هاضم در واقع محفظه‌ای است در ابعاد متناسب با ظرفیت و دبی مورد نیاز که پساب ورودی را در مدتی معین در خود نگه‌داری می‌کند تا پساب در این مدت طی فرایندهای مختلف شیمیایی و بیوشیمیایی تصفیه گردد. هاضم بیهوازی قادر است حجم قابل توجهی از انتشار متان حاصل از پساب‌های دامی، صنعتی و شهری را مهار نماید. اصلی‌ترین عوامل گرمایش زمین، انتشار گاز متان به لایه جو زمین است، که اثر گاز متان حدود ۲۵ برابر اثر کربن دی اکسید در ایجاد فضای گلخانه‌ای است [۲]. در دهه اخیر جهان به سمت استفاده از هاضم بیهوازی هم برای تصفیه فاضلاب و هم برای تولید بیوگاز به‌عنوان منبعی از انرژی تجدیدپذیر و نیز برای تولید کود با کیفیت و ارزان قیمت حرکت کرده است [۳]. کشور ایران هم نیز با توجه به ضرورت تصفیه فاضلاب صنایع مختلف از جمله صنایع دامداری سیاست‌هایی در زمینه استفاده از منابع تجدیدپذیر به اجرا گذاشته است. در این میان یکی از آسان‌ترین و ارزان‌ترین راه‌های تصفیه فاضلاب، به کارگیری هاضم بیهوازی است. این امر اهمیت پرداختن به کلیه جوانب فیزیکی، شیمیایی، بیوشیمیایی و مکانیکی هاضم بیهوازی را دوچندان می‌کند. درجه حرارت یکی از مهم‌ترین عوامل فعالیت‌های میکروبی در هاضم بیهوازی بوده و درصد متان در بیوگاز تولیدی تا حدود زیادی به آن وابسته است. تحقیقات پیشین اثبات کرده‌اند که گروه‌های مختلف از باکتری‌ها در یک محدوده دمای مشخصی قابلیت زنده ماندن را دارند و بر این اساس بهینه‌ترین محدوده دمای کارکرد برای آن‌ها تعیین می‌گردد، به همین ترتیب در یک هاضم بیهوازی دما باید یکنواخت باشد تا از ایجاد نقاط موضعی با درجه حرارت متفاوت و فعالیت باکتری‌های نامطلوب جلوگیری نماید. در داخل یک هاضم بیهوازی سه نوع باکتری شامل سایکروفیلیک^۴، مزوفیلیک^۵ و

⁶ Thermophilic

⁷ Engineering Equation Solver (EES)

⁸ Transys

⁹ Polyvinyl Chloride (PVC)

¹⁰ PEX

¹ Renewable

² Greenhouse Gases

³ Anaerobic Digester

⁴ Psychrophilic

⁵ Mesophilic

جدول ۲- ابعاد فیزیکی هاضم بیهوای ملارد و اجزای آن

نام مشخصه	طول (m)
قطر هاضم	۱۶
ارتفاع هاضم	۳/۲
ضلع ستون مربع	۰/۷
قطر ورودی خوراک	۰/۲
قطر خروجی خوراک	۰/۲
قطر گاز	۰/۲
ارتفاع ورودی خوراک از کف	۱
ارتفاع خروجی از کف	۰/۱
طول لوله پکس	۴۷۱

که در آن Q_{Solar} : انرژی تشعشی ناشی از خورشید به هاضم، $Q_{heating}$: تبادل حرارت بین کویل‌های گرمایش و خوراک هاضم، $Q_{manure, out}$: انرژی سیال خروجی از هاضم، $Q_{manure, in}$: انرژی سیال ورودی به هاضم و Q_{wall} ، Q_{Cover} ، Q_{floor} : تبادل حرارت بین بدنه، سقف و کف هاضم با هوا آزاد محیط برحسب وات است.

۳-۱-۱- تبادل حرارت در بدنه هاضم

اتلاف حرارتی از دیواره هاضم از طریق انتقال حرارت جابه‌جایی انجام می‌گیرد، بنابراین میزان حرارت از دست رفته از هاضم به جنس مواد به کار رفته در دیوار، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد دیوار و اختلاف دمای بین دمای دیواره هاضم با دمای محیط بیرون بستگی دارد.

$$Q_{wall} = h_{wall} \cdot A_{wall} (T_{wall} - T_a) \quad (۲)$$

در این معادله T_{wall} دمای بدنه، T_a دمای هوا آزاد، h_{wall} ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد و A_{wall} مساحت کل دیواره است. طی سالیان متمادی دانشمندان دریافته‌اند که مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد برای شرایط گوناگون را می‌توان به صورت تابع زیر نمایش داد [۶]:

$$Nu = C(Gr_f \cdot Pr_f)^m \quad (۳)$$

در معادله فوق مقادیر C و m مقادیر ثابت که برای استوانه قائم به ترتیب ۰/۱ و ۰/۳۳ است و پانویس f نشان می‌دهد که خواص مربوط به گروه‌های بی‌بعد در درجه حرارت لایه نازک ارزیابی شده‌اند:

$$T_f = \frac{T_a + T_{wall}}{2} \quad (۴)$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (۵)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\alpha \cdot \nu_a} \quad (۶)$$

که در آن L ارتفاع استوانه، α ضریب پخش حرارتی هوا در دمای فیلم، ν_a ویسکوزیته هوا و ΔT اختلاف دما بین دمای دیوار هاضم و دمای بیرون است. کلیه خواص هوا در دمای T_f بدست آمده‌اند.

$$Ra = Gr \times Pr \quad (۷)$$

در رابطه فوق Gr عدد گراش^۱ و Pr عدد پرانتل^۲ و Ra عدد رایلی^۳ می‌نامند، شرط کلی برای اینکه بتوان استوانه قائم را مانند صفحه مسطح در نظر گرفت این است که [۷]:

$$(Gr \cdot Pr)^{1/4} \frac{D}{L} > 38 \quad (۸)$$

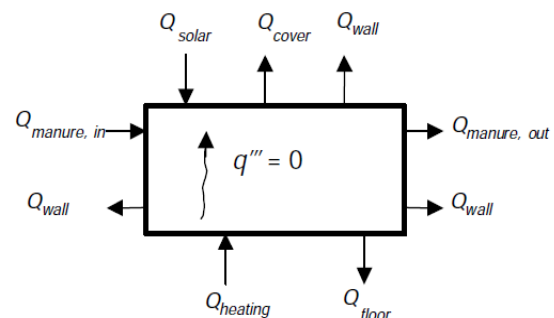
۳- معادلات حاکم و شبیه‌سازی سیستم گرمایش

در این پژوهش باتوجه به فیزیک هاضم بیهوای مورد نظر و معادلات انتقال حرارت، روابط حاکم بر مسئله بیان می‌گردد. این روابط شامل معادلات تبادل حرارت بین هاضم و محیط، سقف، کف، دیوار هاضم و معادلات انتقال حرارت بین کویل‌های گرمایش و خوراک هاضم است که این روابط براساس موارد زیر بیان می‌گردد:

- ۱) جنس و مواد مورد استفاده در ساخت هاضم و موقعیت قرارگیری هاضم از نظر اینکه در بالا یا پایین سطح زمین قرار دارد.
- ۲) استفاده از کویل‌های گرمایشی برای گرم کردن سیال درون هاضم
- ۳) ثابت نگه‌داشتن دمای خوراک داخل هاضم
- ۴) انتقال گرما به‌صورت پایدار در داخل سیستم
- ۵) شبیه‌سازی حرارتی هاضم ملارد به صورت پایا در بحرانی‌ترین و سردترین درجه حرارت در کل سال در منطقه دامداری ملارد انجام خواهد گرفت.

۳-۱- مدل تبادل حرارت در هاضم

در یک هاضم بیهوای برای برقراری بالانس انرژی درون آن، هاضم به عنوان حجم کنترل در نظر گرفته می‌شود که براساس آن معادلات حرارتی نوشته خواهد شد. نمای کل آن مطابق شکل زیر است.



شکل ۱- نمای کلی توازن انرژی در هاضم

براساس شکل بالا موازنه انرژی درون هاضم به صورت رابطه زیر است:

$$Q_{Solar} + Q_{heating} - \left[(Q_{manure, out} - Q_{manure, in}) + Q_{wall} + Q_{Cover} + Q_{floor} \right] = 0 \quad (۱)$$

^۱ Grashof number

^۲ Prandtl Number

^۳ Rayleigh Number

$$Q_{cover} = q_{cover} \times A_{cover} \quad (18)$$

که در آن Re عدد رینولدز^۲، u_a سرعت هوا، k_a ضریب هدایتی هوا است. عدد پرناتل برای استوانه عمودی برابر ۰/۷ است.

۳-۱-۴- تبادل حرارت در کویل‌های گرمایشی

آب داغ داخل کویل‌های گرمایشی نقش اصلی برای ثابت نگه داشتن دمای داخل هاضم بیهواری را برعهده دارد. بنابراین معادله اتلاف انرژی از ورود آب داغ به داخل سیستم و خروج آب خنک از آن مطابق زیر است [۹]:

$$Q_{water} = \dot{m}_{water} C_{p_{water}} (T_{Hot} - T_{Cold}) \quad (19)$$

در معادله فوق \dot{m}_{water} دبی جرمی آب در داخل کویل‌ها، $C_{p_{water}}$ ظرفیت گرمایی ویژه آب، T_{Hot} دمای آب داغ ورودی به داخل کویل‌ها و T_{Cold} دمای آب خنک خروجی از کویل‌ها است. بنابراین افزایش دمای هاضم در اثر کویل‌های حرارتی براساس معادلات زیر است:

$$Q_{heating} = \frac{T_w - T_0}{R_{pipe}} \quad (20)$$

$$T_w = \frac{T_{Hot} + T_{Cold}}{2} \quad (21)$$

$$R_{pipe} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi K_{pipe} L_{pipe}} \quad (22)$$

که T_w دمای میانگین آب داغ و خنک، T_0 دمای کارکرد هاضم، R_{pipe} مقاومت حرارتی لوله، r_2 شعاع خارجی لوله، r_1 شعاع داخلی لوله و L_{pipe} طول لوله گرمایش از نوع پکس با K_{pipe} ضریب هدایتی لوله ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) است.

۵-۱-۳- اتلاف حرارت خوراک هاضم

انرژی لازم برای رسیدن دمای خوراک ورودی به دمای عملیاتی هاضم ($Q_{mass\ flow}$) طبق معادله زیر است [۱۰]:

$$Q_{mass\ flow} = \dot{m}_{manure, in} C_{p_{manure}} (T_0 - T_{manure, in}) \quad (23)$$

در معادله فوق $Q_{mass\ flow}$ انرژی لازم برای رسیدن دمای خوراک ورودی به دمای کارکرد هاضم و $\dot{m}_{manure, in}$ ، $C_{p_{manure}}$ ، $T_{manure, in}$ به ترتیب دبی جرمی، ظرفیت گرمایی ویژه و دمای خوراک هاضم است. بنابراین انرژی لازم برای گرمایش هاضم، تابع مقدار حرارت مورد نیاز برای رسیدن دمای خوراک ورودی به دمای عملیاتی هاضم و همچنین مقدار انرژی مورد نیاز برای ثابت نگه داشتن دما مزوفیلیک هاضم است. شرایط کارکرد هاضم مطابق جداول زیر است:

سپس با توجه به این روابط مقدار عدد ناسلت^۱ مشخص خواهد شد. در نهایت با توجه به مقدار آن، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد در بدنه هاضم طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Nu = \frac{h_{wall} \cdot L}{\nu_a} \quad (9)$$

۳-۱-۲- تبادل حرارت از کف هاضم

اتلاف حرارت از کف هاضم به خاک اطراف آن به صورت انتقال حرارت هدایت صورت می‌پذیرد که براساس روابط (۱۰) و (۱۱) بدست می‌آید:

$$q''_{floor} = \frac{T_0 - T_{soil}}{R_{floor}} \quad (10)$$

$$R_{floor} = \frac{X_{floor}}{k_{floor}} \quad (11)$$

$$Q_{floor} = q''_{floor} \times A_{floor} \quad (12)$$

در این روابط T_{soil} دمای خاک اطراف، R_{floor} مقاومت حرارتی کف هاضم، X_{floor} ضخامت مصالح کف هاضم، k_{floor} قابلیت هدایت حرارتی کف هاضم و A_{floor} مساحت کف هاضم بیهواری است.

۳-۱-۳- تبادل حرارت از سقف هاضم

تبادل حرارتی از سقف، ناشی از انتقال حرارت جابه‌جایی بین سقف و هوای بیرون و انتقال حرارت تشعشی است. اگر T_{sur} دمای سطح هاضم بزرگتر از T_a دمای هوای آزاد باشد، در این صورت اتلاف حرارتی به‌خصوص در فصل زمستان خواهیم داشت. بنابراین تبادل حرارت از سقف با هوایی آزاد بدون در نظر گرفتن ضخامت بیوگاز، طبق معادله زیر است:

$$q_{cover} = q_{convection} + q_{radiation} \quad (13)$$

$$\frac{T_0 - T_{sur}}{R_{cover}} = h_{cover} (T_{sur} - T_a) + \sigma (T_{sur}^4 - T_a^4) \quad (14)$$

$$R_{cover} = \frac{L_{cover}}{k_{cover}} \quad (15)$$

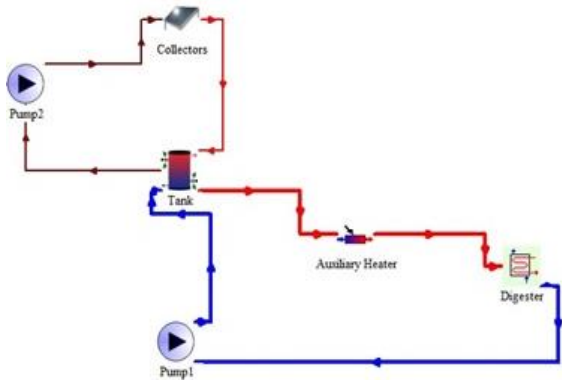
که در آن L_{cover} ضخامت سقف هاضم، k_{cover} قابلیت هدایت حرارتی سقف، h_{cover} ضریب جابه‌جایی سقف و σ ثابت استفهان بولتزمن برابر $5.669 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ است که از روابط زیر بدست می‌آید [۸]:

$$Re = \frac{u_a \cdot L_{cover}}{\nu} \quad (16)$$

$$Nu = \frac{h_{cover} L_{cover}}{k_a} = \begin{cases} 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} & Re < 2 \times 10^5 \\ 0.037 Re^{4/5} Pr^{1/3} & Re > 3 \times 10^6 \end{cases} \quad (17)$$

²- Reynolds number

¹ Nusselt Number

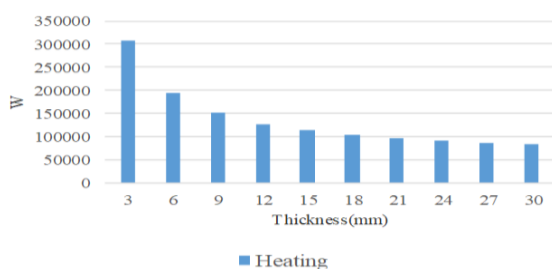


شکل ۳- سیستم خورشیدی همراه با تانک ذخیره آب گرم

در سیستمی که در شکل ۲ نشان داده شده است، آب ابتدا وارد یک منحرف کننده جریان خواهد شد که وظیفه آن جدا کردن جریان بین کلکتور خورشیدی و سیستم کمکی است، بدین صورت که با پدیدارگشتن نور خورشید (در طول روز) آب ورودی به داخل کلکتور خورشیدی ابتدا پمپ می شود بعد از آن به داخل کویل های حرارتی وارد می شود. در صورتی که آب ورودی به کویل ها در درجه حرارت کافی باشد مستقیم به داخل کویل ها پمپ می شود و در صورتی که درجه حرارت آن کمتر از مقدار تعریف شده ترموستات باشد آب وارد سیستم کمکی شده و بعد از آن وارد کویل ها خواهد شد. اما به هنگام شب که آب دارای درجه حرارت کافی نیست، مستقیم به داخل سیستم کمکی پمپ می شود سپس مرحله قبل تکرار شود. بدین ترتیب سیال (آب) یک چرخه کامل را طی می کند. در سیستمی که در شکل ۳ مشاهده می شود، آب با ورود به داخل کلکتور گرم شده و از طریق پمپ به داخل مخزن ذخیره آب پمپ می شود. آب گرم مخزن که بالایی تانک بوده به سمت کویل های گرمایشی حرکت می کند. همانند سیستم شکل ۲ در صورتی که آب ورودی به کویل ها در درجه حرارت کافی باشد مستقیم به داخل کویل ها پمپ می شود و در صورتی که درجه حرارت آن کمتر از مقدار تعریف شده ترموستات باشد آب وارد سیستم کمکی شده و بعد از آن وارد کویل ها خواهد شد. در مرحله بعد آب خروجی از کویل ها به عنوان آب سرد ورودی تانک ذخیره، وارد تانک می شود و از آن طریق قسمتی از آب تانک ذخیره به عنوان آب ورودی به کلکتور مورد استفاده قرار می گیرد.

۴- بحث و نتایج

همان گونه که از این پیش اشاره شد هدف از این پژوهش تعیین حرارت لازم برای ایجاد شرایط مطلوب برای تولید بیوگاز و همچنین رشد و تکثیر میکروارگانیسم برای هاضم بیهوازی مزوفیلیک دامداری ملارد است. ابتدا در این بخش به بررسی میزان اتلاف حرارت در سقف، کف و بدنه هاضم بیهوازی پرداخته شده است.



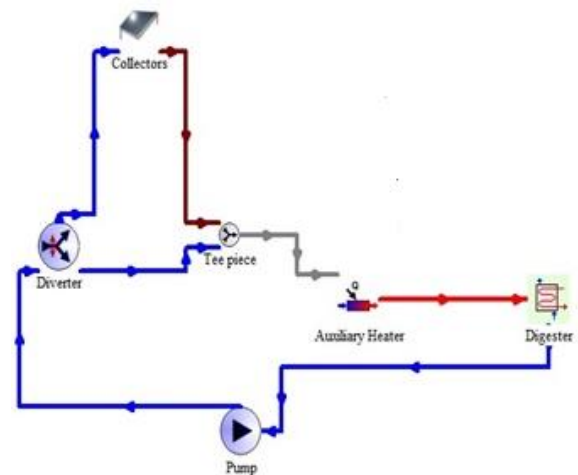
جدول ۳- پارامترهای تعریف شده برای هاضم بیهوازی ملارد

پارامتر	اندازه (واحد)
دما کارکرد هاضم	۳۷ (°C)
دبی خوراک ورودی	۲۰ (m ³ / day)
دما خوراک ورودی	۱۰ (°C)
حداقل دمای آب گرم ورودی به کویل گرمایش	۶۵ (°C)

جدول ۴- خواص مواد در شبیه سازی هاضم بیهوازی ملارد [۶ و ۱۰]

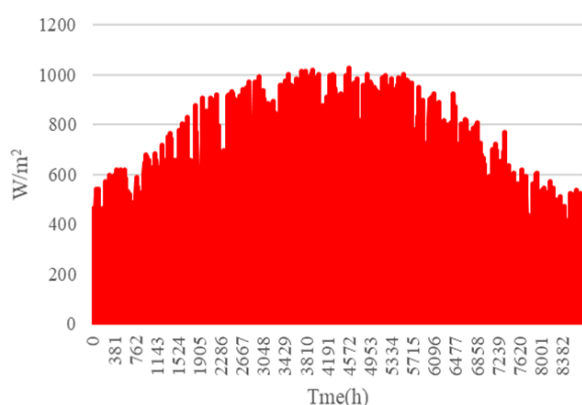
پارامتر	اندازه (واحد)
چگالی بتن	۲۶۰۸ (kg / m ³)
چگالی PVC	۱۳۰۰ (kg / m ³)
ظرفیت گرمایی ویژه بتن	۸۴ (KJ / Kg. °C)
ظرفیت گرمایی ویژه PVC	۹ (KJ / Kg. °C)
قابلیت هدایت حرارتی بتن	۸ (W / m ² . °C)
قابلیت هدایت حرارتی PVC	۱۴ (W / m ² . °C)
ظرفیت گرمایی ویژه آب	۱۹ (KJ / Kg. °C)
ویسکوزیته هوا	۱۴ / ۶۵ × ۱۰ ^{-۴} (m ² / s)
قابلیت هدایت حرارتی هوا	۰.۲۵ (W / m ² . °C)
سرعت هوا	۲ (m / s)
چگالی خوراک ورودی	۱۰۰۱ (kg / m ³)
ظرفیت گرمایی ویژه خوراک ورودی	۱۸ (KJ / Kg. °C)

بخش اصلی یک سیستم خورشیدی در تولید آب گرم بخش کلکتور آن است. شکل ۲ و ۳ به ترتیب مدل سازی سیستم خورشیدی بدون در نظر تانک ذخیره کن (سیستم ۱) و همراه با تانک ذخیره آب گرم (سیستم ۲) در محیط نرم افزار ترنسیس را نشان می دهند.



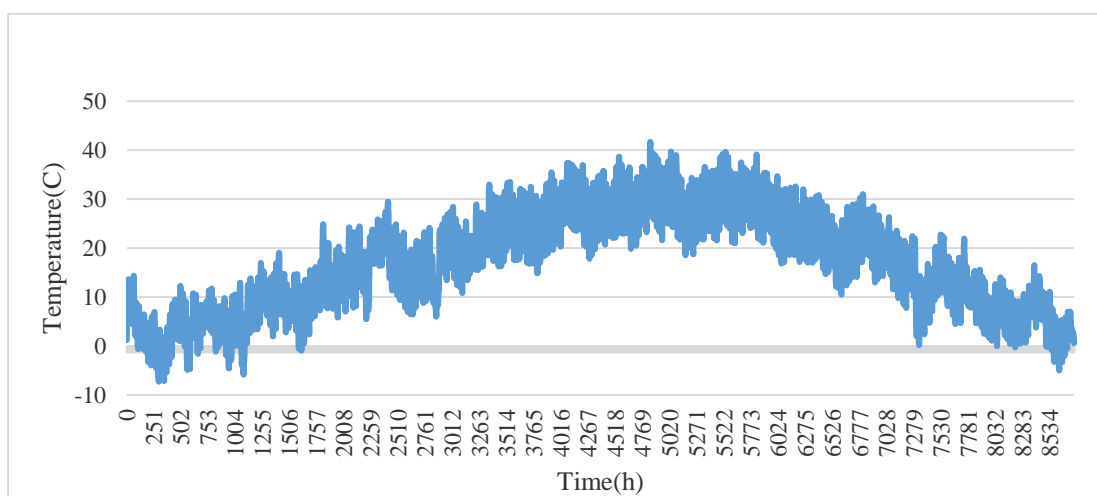
شکل ۲- سیستم خورشیدی بدون تانک ذخیره آب گرم

حرارت جابه‌جایی با محیط بیرون نیز کاهش یافته است، که این امر میزان انتقال حرارت را کاهش خواهد داد. بنابراین باتوجه به نمودار بالا با افزایش ضخامت سقف ازمقدار قابل توجهی از افت حرارتی در هاضم بیهواری جلوگیری نمود. بنابراین، با توجه به ثابت بودن ضخامت کف و دیوار هاضم و این که اتلاف حرارت از این دو مؤلفه نسبت به سقف هاضم به نسبت پایین تر می باشد، می‌توان با افزایش مقاومت حرارتی سقف از اتلاف حرارت قابل توجهی در سقف جلوگیری نمود. دریک سیستم خورشیدی شرایط آب و هوایی منطقه از عوامل موثر برای تولید آب گرم است. در نمودار ۶ شار تابشی کل بر روی سطح افق در دامداری ملارد برای یک دوره یک ساله (۸۷۶۰ ساعت) را نشان می‌دهد. ساعت صفر در این نمودار ابتدا شروع سال میلادی است.

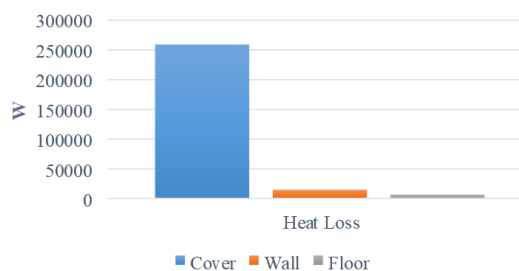


شکل ۶- شار تابشی کل بر سطح افق در طول یک سال

عامل دیگری که بر عملکرد کلکتور خورشیدی تاثیر مسقیم دارد دمای محیط است. شکل ۷ تغییرات دمای محیط در کل ساعات مختلف در یک سال در دامداری ملارد را نشان می‌دهد. این دما در طول سال بین 0°C تا 42°C متغیر است. با پایین بودن دمای محیط، اختلاف دما بین سطح جاذب حرارت و هوا افزایش یافته که نتیجه آن افزایش اتلاف حرارتی از جاذب است و بازده کلکتور را کاهش می‌دهد.

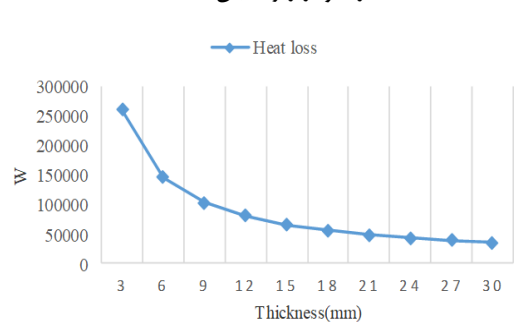


شکل ۷- درجه حرارت محیط در طول سال در منطقه ملارد



شکل ۴- مقدار اتلاف حرارت در کف، دیوار و سقف هاضم بیهواری

در این نمودار، درصد اتلاف حرارت در سقف، دیوار و کف هاضم به ترتیب ۹۲٪، ۵٪ و ۳٪ از کل اتلاف حرارت در هاضم است. بنابراین، بیشترین اتلاف حرارت در کل هاضم در سقف آن است که برای کاهش اتلاف حرارت بایستی مقدار اتلاف را در سقف هاضم کنترل کرد زیرا این اتلاف در هاضم مقدار فراوانی است. بدین منظور با استفاده از لایه-های مختلف سقف هاضم، مقدار افت حرارت در ضخامت‌های مختلف محاسبه شده است که در نمودار زیر نمایان است:



شکل ۵- مقدار اتلاف حرارت در سقف هاضم در ضخامت‌های مختلف سقف

با توجه به نمودار فوق، با افزایش ضخامت چادر پی‌وی.سی در سقف هاضم مقدار اتلاف حرارت آن کاهش پیدا می‌کند. در این نمودار با افزایش ضخامت ابتدا مقدار اتلاف حرارت با شیب سریع، کاهش می‌یابد اما با افزایش تدریجی ضخامت مقدار این شیب ملایم‌تر خواهد بود که دلیل آن می‌تواند به دلیل افزایش ضخامت سقف میزان مقاومت حرارتی آن افزایش یافته و به تبع آن میزان درجه حرارت روی سقف برای انتقال

بالتر و به مراتب باعث افزایش هدر رفتن انرژی و اثرات گالخانه‌ای در اثر سوختن گاز متان بیشتر و تولید گاز کربن دی اکسید بالاتری خواهد شد، با افزایش چادر پی.وی.سی سقف میتوان تا حدود ۷۴٪ دبی جرمی آب داغ ورودی به کویل‌ها را کاهش داد. از این رو استفاده از چادر سقف با ضخامت‌های بالاتر انتخاب بهتری است. در نتیجه برای مدل‌سازی کلکتور خورشیدی صفحه تخت با توجه به دبی آب ورودی به کلکتورها و اختلاف دمای آب ورودی و خروجی، مقدار مساحت بهینه آن‌ها تعیین می‌شود. پارامترها و ورودی ثابت در مدل‌سازی سیستم کلکتور خورشیدی براساس جدول زیر است.

جدول ۶- پارامتر و ورودی ثابت کلکتور خورشیدی صفحه تخت

پارامتر	مقدار (واحد)
مساحت کلکتور	۱۴۸ (m ²)
ظرفیت گرمایی ویژه سیال	۱۹ (KJ / Kg. °C)
دبی سیال	۴۸ (kg / s)

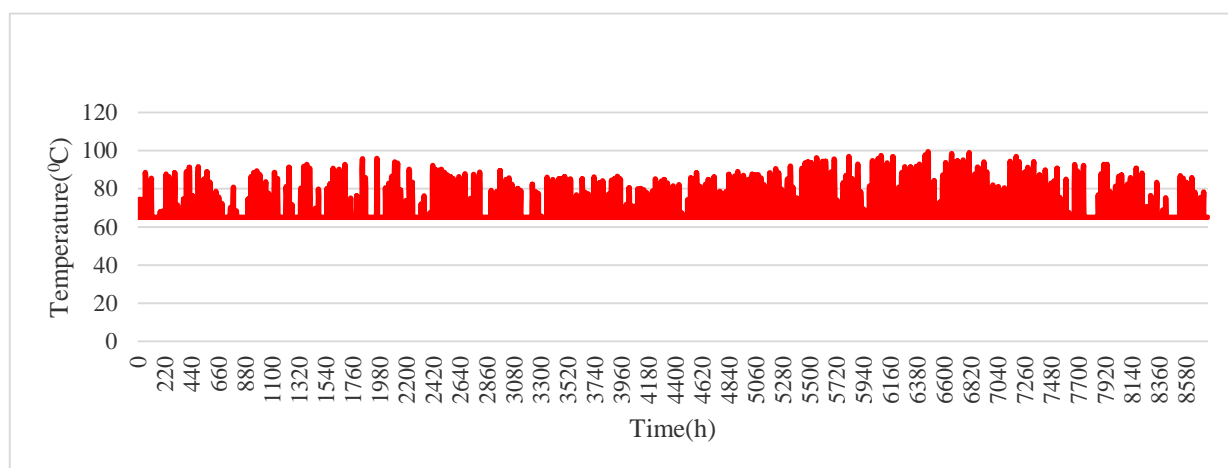
با محاسبه مساحت بهینه کلکتور خورشیدی و وجود سیستم کمکی دیگ آب گرم برای تامین مقدار آب گرم ورودی به لوله‌ها در شرایط ابر، برف و به‌هنگام شب می‌توان شرایط بهینه برای ایجاد حالت مزوفیلیک در دمای ۳۷°C را تامین کرد. نمودار زیر دمای آب ورودی به لوله‌های گرمایش هاضم بیهوازی است.

برای تامین مقدار گرمایش در هاضم بیهوازی بایستی مقدار دبی آب گرم در لوله‌ها تعیین گردد. مقدار حداقل دبی لازم در ضخامت‌های مختلف سقف محاسبه شده است.

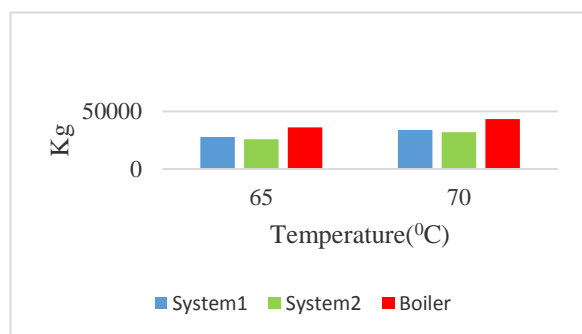
جدول ۵- حداقل دبی آب گرم در لوله‌های گرمایش در ضخامت مختلف سقف

ضخامت	دبی جرمی (kg / s)
۳	۱/۸۳
۶	۱/۱۵
۹	۰/۸۹
۱۲	۰/۷۶
۱۵	۰/۶۷
۱۸	۰/۶۱
۲۱	۰/۵۶
۲۴	۰/۵۳
۲۷	۰/۵۱
۳۰	۰/۴۸

با توجه به جدول ۵، با افزایش ضخامت سقف یا به عبارت دیگر با کاهش اتلاف حرارت در هاضم، مقدار دبی در لوله‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین استفاده از دبی زیاد در لوله‌ها که نتیجه آن هزینه‌های اقتصادی



شکل ۸- دمای آب ورودی به لوله‌های گرمایش در طول سال



شکل ۹- مصرف گاز دیگ آب گرم در سیستم‌های مختلف

در نهایت به مقایسه مقدار مصرف گاز متان در سه حالت سیستم ۱، سیستم ۲ و دیگ آب گرم به تنهایی پرداخته شده است. با توجه به نمودار استفاده از سیستم خورشیدی حدود ۲۳٪ در سیستم ۱ و حدود ۲۸٪ در سیستم ۲ نسبت به دیگ آب گرم به صورت مجزا باعث کاهش مصرف گاز متان در کل سال می‌شود. سیستم ۲ به دلیل استفاده از تانک ذخیره آب گرم مصرف گاز کمتری نسبت به سیستم ۱ دارد. همچنین باتوجه به این نمودار مصرف گاز متان در حداقل دمای آب ورودی با دما ۶۵°C نسبت به دما ۷۰°C حدود ۱۸٪ در هر دو سیستم خورشیدی کاهش مصرف سوخت را به همراه دارد.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش هدف تامین گرمایش لازم برای تولید بیوگاز در هاضم بیهوازی مزوفیلیک و رشد و تکثیر میکروارگانیسم است، که مورد بررسی قرار گرفت و نتایج کلی ذیل حاصل گردید:

- با مقایسه بین سقف، بدنه و کف هاضم، بیشترین اتلاف حرارت از سقف هاضم صورت می گیرد بنابراین با افزایش مقاومت حرارتی سقف بخش قابل توجهی از اتلاف حرارت جلوگیری خواهد شد.
- خروجی شرایط آب و هوای منطقه دامداری ملارد نشان دهنده پتانسیل نسبتاً بالای این منطقه در بکارگیری از انرژی خورشیدی است.
- استفاده از سیستم خورشیدی نسبت به سیستم دیگ آب گرم به صورت مجزا تا حدود ۲۸٪ از مصرف سوخت گاز متان برای تولید آب گرم را کاهش می دهد.
- استفاده از آب ورودی با حداقل دما 65°C نسبت به آب 70°C حدود ۱۸٪ از مصرف گاز سیستم کمکی در کل سال را کاهش خواهد داد.

فهرست علائم

علائم	معنی
A	مساحت، m^2
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه، $\text{KJ.Kg}^{-1}.^{\circ}\text{C}^{-1}$
h	ضریب انتقال حرارت جابه جایی آزاد، $\text{W.m}^{-2}.^{\circ}\text{C}^{-1}$
k	قابلیت هدایت حرارتی، $\text{W.m}^{-1}.^{\circ}\text{C}^{-1}$
L	ارتفاع استوانه، m
L_{cover}	ضخامت سقف هاضم، m
\dot{m}	دبی جرمی، $\text{kg}.s^{-1}$
Q	انتقال حرارت، W
R	مقاومت حرارتی، $^{\circ}\text{C}.W^{-1}$
T	دمای کارکرد هاضم، $^{\circ}\text{C}$
u	سرعت، $m.s^{-1}$
X	ضخامت، m

علامت یونانی

α	ضریب پخش حرارتی، $m^2.s^{-1}$
β	ضریب انبساط حرارتی، K^{-1}
ν_a	ویسکوزیته هوا، m^2/s
σ	ثابت استفهان بولتزمن، $W.m^{-2}.K^{-4}$
ΔT	اختلاف دما بین دمای دیواره هاضم و دمای بیرون، $^{\circ}\text{C}$

زیرنویس

0	دمای کارکرد
A	هوا
Cover	سقف
F	دمای فیلم
Floor	کف
Heating	گرمایش
Manure,in	خوراک ورودی
Manure,out	خوراک خروجی
Soil	خاک
Sur	محیط اطراف
Wall	دیوار
ω	میانگین

بالانویس

*	شرایط مرجع
---	------------

منابع

- [1] Q. Zhang, J. Hu, D.-J. Lee, Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates, Renewable Energy, 98 (2016) 108-119.
- [2] W.J. Mitsch, B. Bernal, A.M. Nahlik, Ü. Mander, L. Zhang, C.J. Anderson, S.E. Jørgensen, H. Brix, Wetlands, carbon, and climate change, Landscape Ecology, 28(4) (2013) 583-597.
- [3] P. Galgani, E. van der Voet, G. Korevaar, Composting, anaerobic digestion and biochar production in Ghana. Environmental-economic assessment in the context of voluntary carbon markets, Waste management, 34(12) (2014) 2454-2465.
- [4] E.C. Ogbonna, R. Ali, G. Pissanidis, Simulation model for mesophilic anaerobic digestion heating system, in: 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), IEEE, 2013, pp. 505-510.
- [5] A. Hashimoto, Y. Chen, R. Hruska, Overall economics of anaerobic digestion, US Dept. of Agriculture, Clay Center, NE (United States). US Meat Animal ..., 1979.
- [6] J. Holman, Heat transfer, 10th editi. ed, Mc-GrawHill Higher education, (2010).

- [7] J. Liu, X. Zhou, J. Wu, W. Gao, X. Qian, Heat transfer analysis of cylindrical anaerobic reactors with different sizes: a heat transfer model, *Environmental Science and Pollution Research*, 24(30) (2017) 23508-23517.
- [8] A.K. Datta, *Biological and bioenvironmental heat and mass transfer*, CRC Press, 2002.
- [9] Y. Cengel, *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*, McGraw-Hill Higher Education, 2014.
- [10] B. Wu, Advances in the use of CFD to characterize, design and optimize bioenergy systems, *Computers and Electronics in Agriculture*, 93 (2013) 195-208.