

養牛場使用沼氣渦輪發電機之性能表現⁽¹⁾

歐修汶⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ 蕭宗法⁽²⁾ 周明顯⁽³⁾

收件日期：109 年 1 月 7 日；接受日期：109 年 5 月 18 日

摘 要

本研究旨在養牛場進行沼氣發電，藉由收集與分析沼氣發電數據，並了解實際運作情形，最後做簡單之經濟分析，以提供做為養牛場日後設置沼氣發電之參考。本試驗使用微型氣渦輪發電機，並以養牛場之廢水處理設施產生之沼氣做為燃料。未經純化之沼氣先經由活性碳吸附塔脫硫處理，純化後之沼氣則導入紅泥膠皮袋儲存；發電機之額定輸出功率設定在 30 kW，於發電機開啟與關閉時，量測並記錄沼氣成分與使用量、發電時間、發電量與前處理設施耗電量。結果顯示，發電機全年平均每小時發電量為 24.7 ± 1.4 kWh；前處理設施全年平均每小時耗電量為 3.6 ± 0.2 kWh，耗電量所占發電量之比值平均值為 $14.7 \pm 0.9\%$ 。沼氣中甲烷濃度平均為 $57.9 \pm 2.1\%$ ，二氧化碳平均濃度為 $29.3 \pm 2.8\%$ 。發電機之熱轉換效率平均為 $20.8 \pm 0.8\%$ ，沼氣消耗量平均為 373.3 ± 12.7 L/min，平均每發 1 度電需消耗 0.83 ± 0.03 m³ 之沼氣。全年試驗期間總計發電量為 33,942 度，若依躉購電價每度 5.0874 元計，估算發電收入為 172,676 元，共減少 18,091 kg CO₂e 之排放。以沼氣發電減少碳排放之貢獻與降低對其他能源的依賴，是值得應用與推廣。

關鍵詞：沼氣、微型氣渦輪發電機、沼氣發電、熱轉換效率、乳牛場。

緒 言

在家畜飼養的過程中，會產生許多有機廢棄物，例如糞尿、飼料或是草料等，在沖洗畜舍的過程中被帶到廢水處理設施，當廢水經微生物之厭氣處理後，除可將有機物降解合成自身所需之營養外，亦會產生一些產物，如沼氣和沼液、沼渣。沼氣直接排放於空氣中會增加許多溫室氣體排放。若能將沼氣收集並加以利用，除可解決上述問題外，又可當成一再生且乾淨之燃料來源，創造牧場收益。在許多處理農業廢棄物的研究中指出，家畜糞尿產生之沼氣主要成分是甲烷和二氧化碳，其濃度分別為 45 – 70% 及 30 – 55% (郭等, 2012; Rasi *et al.*, 2007; Nagy and Wopera, 2012)，其他還有一些微量的氣體，例如硫化氫。沼氣亦可被當成是碳中和 (carbon neutral) 之能量資源 (羅, 2014; Holm-Nielsen *et al.*, 2009)，因植物行光合作用利用太陽輻射和二氧化碳，產生自身有機化合物。因植物被餵飼給動物將碳轉移至動物，然後部分碳回到環境中以二氧化碳之形式 (因呼吸或燃料沼氣產生)，因此，在此循環中淨碳數量為零 (蓋, 2013)。Chen *et al.* (2010) 分析臺灣再生能源狀況，臺灣因為石化能源價格不高比較容易傳輸與利用，消費者的接受度高，導致再生能源並未充分被開發，因此值得去研究並設法並克服上述困境。立法院於 2009 年 7 月 8 日公布「再生能源發展條例」，再生能源將會變得越有競爭力。另外，提倡再生能源對相關產業將提供正向之經濟利益。

目前活塞式 (piston) 或氣渦輪式 (gas-turbine) 的引擎 / 發電機可以經由燃燒沼氣產生電力 (羅, 2014)。本試驗所使用之微型氣渦輪發電機，具有可靠度高、低維護及操作成本、操作容易、低噪音 (< 70 dBA@10 m)、占地小及可在低甲烷濃度 (> 35%) 及高硫化氫濃度 (5,000 ppm) 下運轉等優點 (郭等, 2012)。在國內外，此等發電機有應用在污水處理場 (徐, 2016; 郭等, 2012; Basrawi *et al.*, 2012)、垃圾掩埋場 (郭等, 2012)、養豬場 (李, 2015; 蓋, 2013; 羅, 2014)，但在國內很少應用於養牛場之研究。因此，本研究旨在養牛場進行沼氣發電，藉由收集與分析沼氣發電數據，並了解實際運作情形，最後做簡單之經濟分析，以提供做為養牛場日後設置沼氣發電之參考。

(1) 行政院農業委員會畜產試驗所研究報告第 2638 號。

(2) 行政院農業委員會畜產試驗所產業組。

(3) 國立中山大學環境工程研究所。

(4) 通訊作者，E-mail: hwou@mail.tlri.gov.tw。

材料與方法

I. 沼氣來源與處理

試驗於 2014 年本所產業組乳牛場之廢水處理設施進行，乳牛場飼養 200 頭乳牛，養牛廢水以三段式（固液分離、厭氣、好氣）處理，其中厭氣處理所產生之沼氣（為未經處理之沼氣），為本試驗沼氣來源。未經處理之沼氣會先經紅泥膠皮袋收集，由一臺沼氣抽氣機，沼氣由活性炭吸附塔底部，通過填充之柱狀活性炭層，經由活性炭表面之孔隙對沼氣行吸附作用，主要將沼氣成分中之硫化氫吸附在活性炭中，經吸附處理後之沼氣再進入另一紅泥膠皮袋收集備用。

II. 沼氣渦輪發電機組與操作流程

沼氣渦輪發電機組由空壓機 (H-50, Fu Sheng Industrial Co., Taiwan)、冷凍乾燥機 (RD-20A, 通世興業有限公司, 臺灣)、高壓鋼桶和氣渦輪發電機 (CR30, Capstone Turbine Co., USA) 所組成，其中空壓機 (5 HP) 與冷凍乾燥機 (0.5 HP) 屬於燃料前處理機 (圖 1)，於發電運轉中會消耗電能；氣渦輪發電機為氣冷式連續運轉型、全機無使用潤滑油脂、發電容量輸出電力 30 ± 1 kW、熱效率 $25 \pm 2\%$ 、電力輸出三相四線 400 – 480 VAC / 60 Hz、噪音 65 dB(A)、適用於畜牧沼氣或掩埋場沼氣供作為發電燃料、排氣溫度 275°C 。空壓機將純化後之沼氣 (硫化氫濃度 < 100 ppm) 抽進冷凍乾燥機中，藉由壓力與溫度變化，將沼氣中多餘之水分排除，經壓縮且脫水之沼氣則提供做為發電機燃料。將發電機之額定輸出功率 (rated power output) 設定在 30 kW，然後啟動發電機後燃燒沼氣，將沼氣之能量轉換成電能及熱能。發電機運轉產生之電力則經由線路併聯至市電，供養牛場使用；廢熱則經排氣管直接排放於大氣中。

III. 檢測項目與方法

於每次操作發電機時，記錄發電量、耗電量、沼氣成分與沼氣消耗量。總發電量與耗電量由設置於電箱中之電錶 (D-68T, Tatung Co., Taiwan 和 DEM560, DAE Automation Co., Taiwan) 累計；沼氣成分以可攜式多用氣體偵測器 (Dräger X-am 7000, Dräger Safety AG & Co, KGaA, Germany) 偵測，甲烷 (CH_4)、二氧化碳 (CO_2) 及氧氣 (O_2) 濃度之偵測極限分別為 0 – 100%、0 – 100% 和 0 – 25%。發電機以手動按壓開關的方式開啟，於每次啟動發電前，先量測儲存於紅泥膠皮袋備用沼氣中 CH_4 、 CO_2 及 O_2 濃度，並於空壓機前端安裝氣體流量計 (TBX100, Aichi Tokei Denki Co., Japan)，累計每次發電時所消耗沼氣量。本試驗全年度共操作 206 天 (次)。



圖 1. 乳牛場廢水處理系統之沼氣發電前處理設備 (左：冷凍乾燥機；右：空壓機)。

Fig. 1. Pre-treatment facility in biogas power generator from wastewater treatment system of the dairy farm (Left: Freeze dryer; Right: Air compressor).

結果與討論

將整年度沼氣發電之資料進行整理成表 1，整年度不同月份之平均每小時發電量範圍在 23.0 – 27.3 kWh，全年平均為 24.7 ± 1.4 kWh，此結果與蓋 (2013) 在發電機額定輸出為 30 kW 時，實際最大之發電輸出量為 25.2 kWh 接

近。平均每小時耗電量範圍在 3.3 – 3.9 kWh，全年平均為 3.6 ± 0.2 kWh，因氣渦輪發電機於運轉過程中，沼氣需經前處理設備將沼氣加壓並去(脫)水後，再將沼氣打入並儲存於不鏽鋼桶中供應發電機燃料，而此前處理設備會消耗電能，故將前處理設備之馬達馬力進行耗電量估算，計算公式如下：

$$\text{空壓機 } 5.5 \text{ HP} + \text{冷凍乾燥機 } 0.5 \text{ HP} = 5.5 \text{ HP}$$

$$1 \text{ HP} = 0.746 \text{ kW}, \text{ 馬力換算成耗電量} = 5.5 \text{ HP} \times 0.746 \text{ kW/HP} = 4.103 \text{ kW}$$

即可得每小時耗電量為 4.103 kWh，此計算值皆高於本研究實際紀錄之數據，顯示本研究所使用之前處理設備並未超過其額定負載量。另外將耗電量除以發電量所得比值之百分比範圍在 12.7 – 15.9%，平均 $14.7 \pm 0.9\%$ 。顯示於發電機操作過程中，所輸出之電力約 15% 需消耗在前處理設備上，而實際可供使用之電力約剩 85%。因此若能在前處理設備之耗電作改進，將有助提升可用之電量。

表 1. 2014 年畜試所乳牛場廢水處理系統不同月份平均每小時發電量

Table 1. Average hour power generation in different months of the year 2014 from wastewater treatment system of TLRI dairy farm

Month	Power generation (kWh)	Electricity consumption (kWh)	Consumption ratio (%)	Temperature (°C)
Jan	27.3	3.9	14.3	16.4
Feb	26.5	3.9	14.8	17.8
Mar	25.9	3.9	15.2	20.9
Apr	24.3	3.8	15.7	24.4
May	24.3	3.7	15.1	26.2
Jun	23.4	3.6	15.2	28.4
Jul	23.0	3.7	15.9	29.4
Aug	23.5	3.3	13.9	27.9
Sep	23.2	3.4	14.6	28.2
Oct	24.3	3.5	14.4	25.0
Nov	24.6	3.5	14.2	23.0
Dec	25.6	3.3	12.7	17.1
Mean	24.7	3.6	14.7	23.7

進一步討論溫度對發電量之影響，本試驗之室外溫度資料來源是根據交通部中央氣象局畜試所農業氣象觀測站(以下簡稱畜試所測站)溫度記錄，全年平均溫度為 $23.7 \pm 4.7^\circ\text{C}$ ，月平均溫度範圍在 $16.4 - 29.4^\circ\text{C}$ ，畜牧場室外月平均溫度與發電量關係如圖 2 所示，隨著溫度逐漸增加，發電量則逐漸下降；當溫度逐漸降低時，發電量則上升，發電量與溫度間之相關係數 -0.96 ，呈高度負相關 ($p = 0.000$)。Vidal *et al.* (2007) 利用丙烷當燃料，評估外界溫度對渦輪發電機效率之表現，結果顯示，當室溫從 24.4 升至 28.9°C 時，實際發電功率減少 5.1% (25.5 降至 24.2 kWh) 及其熱轉換效率減少 2.0%。羅 (2014) 的研究結果顯示，當環境溫度從 21.8°C 上升至 31.4°C ，其發電功率與熱效率分別減少 9.6% (26.56 降至 24.01 kWh) 和 2.9%，而本研究月平均溫度從 1 月 16.4°C 上升至 7 月 29.4°C ，溫差高達 13°C ，發電功率下降約 16% (27.3 降至 23 kWh)。Basrawi *et al.* (2011) 利用微型渦輪發電機結合汽電共生 (cogeneration) 系統研究發電機進氣時之環境溫度對此系統性能之影響，結果顯示當環境溫度升高時，發電機之熱轉換效率降低，但其汽電共生系統對廢熱之回收率增加。經上述研究顯示高環境溫度對發電機之發電表現有不良之影響，可能是因為高溫使發電機散熱更不易，亦或可能因其溫度差異變小，使轉換效率降低。

整年度之沼氣產量為 $38,860 \text{ m}^3$ ，平均每月之沼氣量為 $3,238 \text{ m}^3$ 。不同月份之沼氣成分，在沼氣中濃度占比最大且對發電量主要影響之成分為甲烷與二氧化碳(表 2)，其中甲烷濃度範圍在 $55.2 - 62.0\%$ ，平均為 $57.9 \pm 2.1\%$ ；而二氧化碳濃度範圍在 $24.4 - 33.1\%$ ，平均為 $29.3 \pm 2.8\%$ ；甲烷濃度與二氧化碳濃度間之相關係數 (-0.72) 呈高度負相關，即當甲烷濃度增高時，二氧化碳濃度則會降低，但二成分加總約占沼氣成分 $87.1 \pm 1.9\%$ 。在畜牧廢水厭氣處理中，主要還原反應產物為甲烷，而二氧化碳則為氧化反應之產物。結合表 1 和表 2 之資料計算分析顯示，月均溫與甲烷濃度間之相關係數為 -0.59 ，呈中度負相關；月均溫與二氧化碳濃度間之相關係數為 0.62 ，呈中度正相關。

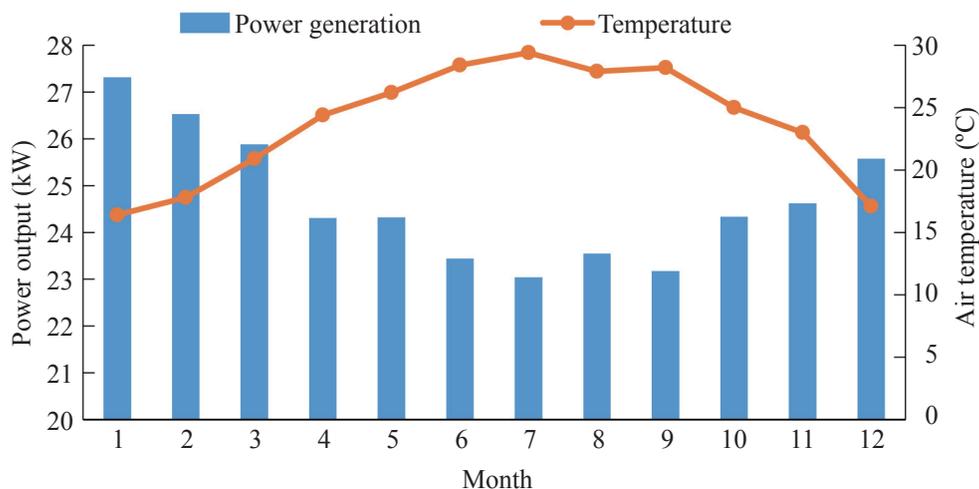


圖 2. 2014 年乳牛場廢水處理系統不同月份發電量與月均溫之變化。

Fig. 2. Power generation and average temperature in different months of the year 2014 from wastewater treatment system of the dairy farm.

表 2. 2014 年畜試所乳牛場廢水處理系統之不同月份沼氣成分

Table 2. Biogas compositions in different months of the year 2014 from wastewater treatment system of TLRI dairy farm

Month	CH ₄ concentration (%)	CO ₂ concentration (%)
Jan	59.2 ± 2.0	27.8 ± 4.1
Feb	57.5 ± 5.8	27.5 ± 3.3
Mar	58.1 ± 1.3	31.3 ± 2.4
Apr	56.4 ± 2.4	30.8 ± 3.2
May	55.8 ± 3.5	30.3 ± 1.0
Jun	55.2 ± 2.1	31.8 ± 3.4
Jul	54.8 ± 3.4	33.1 ± 5.7
Aug	57.5 ± 3.3	32.6 ± 3.8
Sep	59.4 ± 0.5	29.0 ± 0.6
Oct	60.0 ± 1.7	27.0 ± 4.4
Nov	58.3 ± 4.1	24.4 ± 5.7
Dec	62.0 ± 3.6	25.5 ± 2.8
Mean ± SD	57.9 ± 2.1	29.3 ± 2.8

在沼氣成分對發電量之影響方面，圖 3 顯示甲烷與二氧化碳濃度對發電量之影響，甲烷濃度與發電量間呈中度正相關 ($r = 0.44$)，即隨著沼氣中甲烷濃度降低，發電量亦隨之下降，因甲烷濃度降低會使沼氣熱值降低；而二氧化碳濃度與發電量間呈中度負相關 ($r = -0.49$)，即隨著沼氣中二氧化碳濃度增加，發電量則隨之下降，因二氧化碳濃度增加亦會降低沼氣之熱值。Lee *et al.* (2013) 利用四行程柴油引擎發電機進行測試，比較沼氣燃料中不同甲烷濃度 (73 和 60%) 對發電機之表現，結果顯示發電量會隨甲烷濃度增加而上升。Somehsaraei *et al.* (2014) 使用沼氣與天然氣為燃料比較分析渦輪發電機之發電表現，因不同來源之沼氣中甲烷濃度會受許多因素影響，並評估是否合適做為渦輪發電機之燃料。結果顯示發電機因沼氣中甲烷濃度減少而降低發電效率，特別是在低電力負載或低環境溫度時；而其在熱交換器之熱回收，亦因沼氣濃度減少而使回收率降低。但其結論指出，利用沼氣為燃料來源雖略有負面之影響，但在減少對石化燃料的依賴和有助減少溫室氣體之排放上，使用沼氣燃料是可行的。因沼氣發電主要是將沼氣中甲烷燃燒產生之熱能轉換為電能，故理論上甲烷濃度高低對發電量是有影響的，但因本研究量測之甲烷濃度變化較小，且對發電量之影響可能不如室外溫度變化來得大。二氧化碳濃度高低則會影響沼氣之熱值，間接影響發電量，但影響遠不如室外溫度變化。

在不同沼氣濃度對沼氣消耗量與總發電量計算所得之沼氣發電熱轉換效率 (thermal efficiency) 與每產 1 度電所需消耗沼氣量之比值整理如表 3 所示。每次發電操作時可量得沼氣成分濃度、發電時間、總發電量及沼氣消耗量，再藉由公式換算沼氣消耗量對應產生之電量與實際總發電量，可得到當次發電之熱轉換效率值，公式如下所示 (蓋, 2013)：

$$\text{熱轉換效率 (thermal efficiency)} = \frac{\text{實際發電量 (actual power generation)}}{\text{能量輸入量 (energy input)}}$$

本研究之實際發電量，就是指發電機當次操作之總發電量 (power output)，而能量輸入量則是從甲烷之低位發熱量 (lower heating value, LHV) 計算。LHV 為燃燒所產生的水份以蒸氣的形式存於產物中，常稱為低熱值或低位發熱量，用來表示該化合物之燃燒熱。假設 95% 甲烷 LHV 為 34 MJ/m^3 (Nagy and Wopera, 2012)，其計算公式如下：

$$\text{Energy input} = \dot{m}_{\text{CH}_4} \times \text{LHV of CH}_4$$

其中 \dot{m}_{CH_4} 為甲烷在沼氣中之質流量 (mass flow rate)，而其計算公式如下：

$$\dot{m}_{\text{CH}_4} = \text{Biogas flow rate (沼氣流量)} \times \rho_{\text{CH}_4}$$

其中 ρ_{CH_4} 為甲烷之密度。藉由實驗紀錄之甲烷濃度與總沼氣消耗量計算可得沼氣之燃燒熱值 (MJ)，再換算成電能單位 (kW) 最後與紀錄之總發電量計算而得到熱轉換效率。

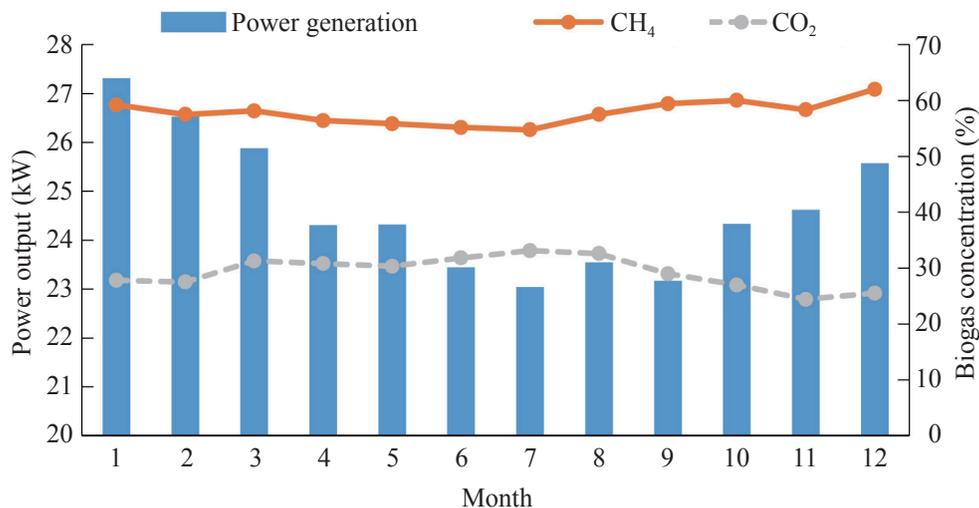


圖 3. 2014 年乳牛場廢水處理系統不同月份發電量與沼氣成分變化。

Fig. 3. Power generation and biogas compositions in different months of the year 2014 from wastewater treatment system of the dairy farm.

試驗之沼氣中甲烷濃度在 55 – 61%，發電機熱轉換效率範圍在 19.6 – 22.0%，平均 $20.8 \pm 0.8\%$ (表 3)，此效率低於蓋 (2013) 之 23.1%，亦低於原廠規範之數值 ($26 \pm 2\%$)。在熱轉換效率之計算上會受沼氣中甲烷濃度影響，隨甲烷濃度增加，平均熱轉換效率有些微變差；但在產生每度電時所消耗之沼氣量，則隨甲烷濃度增加，有些許減少。黃 (2011) 以不同甲烷濃度 (60% 與 73%) 對發電效能之研究中提到，提升甲烷濃度，發電功率隨著甲烷濃度提升而提升；但在燃料較濃之情況下 (即機器所提供之空氣量固定時)，提升甲烷濃度對熱轉換效率沒有好的影響，與本研究結果相似，而本研究中之甲烷濃度僅差 6%，所造成之影響較不顯著。計算結果顯示，此發電機發電時，僅將約 21% 之熱能轉換為電能，其餘之熱能則藉由發電機上方排氣管排出，顯示仍有相當大比例之熱能未能利用到。沼氣平均消耗量介於 351 – 401 L/min，平均 $373 \pm 12.7 \text{ L/min}$ ，此結果高於蓋 (2013) 所做之研究之最大值 252 L/min (CH₄ 濃度為 67%)。以最大值 400 L/min 估算，推測要維持此發電機於額定電力輸出 30 kW 每日 24 小時運轉時，則畜牧場每日約需提供 576 m³ 之沼氣。最後將耗電量除以發電量所得之比值，代表每產生 1 度電需消耗多少沼氣，此值之範圍在 0.77 – 0.88 m³，平均值為 $0.83 \pm 0.03 \text{ m}^3$ ，可藉此計算值估算場內發電機每日發電所需之沼氣量。於全年 (1374.2 小時 / 年) 試驗期間總計發電量為 33,942 kWh，全年平均每小時發量約為 24.7 kWh，以參考經濟部能源局公布 108 年度再生能源電能躉購費率計算，生質能 (有厭氣消化設備) 之躉購電價每度 5.0874 元計，

發電之收入為 172,676 元；因沼氣發電屬於碳中和，不會增加二氧化碳之量，依照經濟部能源局公布 107 年度電力排碳係數，每產生一度電，會產生 0.533 kg CO₂e，本研究沼氣發電共減少 18,091 kg CO₂e 之排放。

蓋 (2013) 在其研究中指出，約 60% 之沼氣能量以熱能之形式損失，約 15% 能量以摩擦力之形式損失，而只剩約 25% 的能量可供利用，因此若能將熱能損失之能量回收，將可大大提升可用之能量 (雷及王，1996；雷及鄭，1996)。在國外已有成功的結合汽電共生系統，提升沼氣發電後之廢熱回收效率 (Monteiro *et al.*, 2009; Basrawi *et al.*, 2011; Basrawi *et al.*, 2012)，最高可達 85%。

表 3. 2014 年畜試所乳牛場廢水處理系統之甲烷濃度對發電效能的影響

Table 3. Effects of methane concentration on power generator performance of the year 2014 from wastewater treatment system of TLRI dairy farm

CH ₄ concentration (%)	Power output (kW)	Biogas consumption (m ³)	Thermal efficiency (%)	Biogas/Power (m ³ /kW)
55.0	93	78.95	21.5	0.85
55.0	135	117.78	21.0	0.87
55.0	129	110.65	21.3	0.86
Mean			21.3	0.86
57.0	221	194.65	20.0	0.88
57.0	191	153.08	22.0	0.80
57.0	92	76.73	21.2	0.83
57.0	108	88.24	21.6	0.82
Mean			21.2	0.83
60.0	66	56.54	19.6	0.86
60.0	220	180.87	20.4	0.82
60.0	224	177.14	21.2	0.79
60.0	94	78.50	20.1	0.84
Mean			20.3	0.83
61.0	230	191.75	19.8	0.83
61.0	181	140.16	21.3	0.77
61.0	62	49.91	20.5	0.80
Mean			20.5	0.80

結 論

本研究使用微型氣渦輪發電機，以 200 頭乳牛的養牛場之廢水處理設施產生之沼氣做為燃料，發電機之額定輸出功率設定在 30 kW。獲致下列結論：

- I. 發電機全年平均每小時發電量為 24.7 ± 1.4 kWh；前處理設施全年平均每小時耗電量為 3.6 ± 0.2 kWh，耗電量占發電量比平均值為 $14.7 \pm 0.9\%$ 。
- II. 沼氣中甲烷濃度平均為 $57.9 \pm 2.1\%$ ，二氧化碳平均濃度為 $29.3 \pm 2.8\%$ 。發電機之熱轉換效率平均為 $20.8 \pm 0.8\%$ ，沼氣消耗量平均為 373.3 ± 12.7 L/min，平均每發 1 度電需消耗 0.83 ± 0.03 m³ 之沼氣。
- III. 一年中共發電 1374.2 小時，總計發電量為 33,942 度，發電收入為 172,676 元，共減少 18,091 kg CO₂e 之排放。
- IV. 本研究中對前處理設備之耗電量進行分析結果顯示其占整個發電量約 15%，若能提升前處理設備之效能，降低其耗電量，將有助提升發電效率。以沼氣發電減少碳排放之貢獻與降低對其他能源的依賴，是值得應用與推廣的。

參考文獻

- 李宗翰。2015。提高豬場沼氣發電效益之研究。國立交通大學機械工程學系博士論文，新竹。
- 徐瑋勵。2016。沼氣發電對溫室氣體的減量及排放與環境衝擊之評估。國立臺灣大學環境工程學研究所碩士論文，臺北。
- 郭猛德、陳志成、程梅萍、蘇進興。2012。沼氣發電系統發展概況。中技社通訊 100：12-17。
- 黃聖容。2011。利用廢熱回收提升進氣溫度對沼氣發電的影響研究。國立交通大學機械工程學系碩士論文，新竹。
- 雷鵬魁、王豐文。1996。養豬場利用沼氣發電機之基礎研究。畜產研究 29：31-42。
- 雷鵬魁、鄭水松。1996。養豬場沼氣發電機性能調查評估。畜產研究 29：15-30。
- 蓋泰全。2013。養豬場使用沼氣微型渦輪發電機發電之實驗研究。國立交通大學機械工程學系碩士論文，新竹。
- 羅晨愷。2014。養豬場環境溫度對 30kW 沼氣渦輪發電機發電影響之實驗研究。國立交通大學機械工程學系碩士論文，新竹。
- 經濟部能源局。2019。107 年度電力排碳係數。https://www.moeaboe.gov.tw/ecw/populace/content/ContentDesc.aspx?menu_id=6989。
- 經濟部能源局。2019。中華民國一百零八年度再生能源電能躉購費率及其計算公式(附表)。https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/main/Law/wHandEditorFile.ashx?file_id=5551。
- Basrawi, F., T. Yamada, K. Nakanishi and S. Naing. 2011. Effect of ambient temperature on the performance of micro gas turbine with cogeneration system in cold region. *Appl. Therm. Eng.* 31: 1058-1067.
- Basrawi, M. F. B., T. Yamada, K. Nakanishi and H. Katsumata. 2012. Analysis of the performances of biogas-fuelled micro gas turbine cogeneration systems (MGT-CGSS) in middle-and small-scale sewage treatment plants: Comparison of performances and optimization of MGTs with various electrical power outputs. *Energy* 38: 291-304.
- Chen, F., S. Lu, E. Wang and K. Tseng. 2010. Renewable energy in Taiwan. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14: 2029-2038.
- Holm-Nielsen, J. B., T. Al. Seadi and P. Oleskowicz-Popiel. 2009. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresour. Technol.* 100: 5478-5484.
- Lee, T., S. Huang and C. Chen. 2013. The experimental study on biogas power generation enhanced by using waste heat to preheat inlet gases. *Renew. Energy* 50: 342-347.
- Nagy, G. and Á. Wopera. 2012. Biogas production from pig slurry-feasibility and challenges. *Mater. Sci. Eng.* 37/2: 65-75.
- Rasi, S., A. Veijanen and J. Rintala. 2007. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. *Energy* 32: 1375-1380.
- Monteiro, E., N. A. Moreira and S. Ferreira. 2009. Planning of micro-combined heat and power systems in the Portuguese scenario. *Appl. Energy* 86: 290-298.
- Somehsaraei, H. N., M. M. Majoumerd, P. Breuhaus and M. Assadi. 2014. Performance analysis of a biogas-fueled micro gas turbine using a validated thermodynamic model. *Appl. Therm. Eng.* 66: 181-190.
- Vidal, A., J. C. Bruno. R. Best and A. Coronas. 2007. Performance characteristics and modelling of a micro gas turbine for their integration with thermally activated cooling technologies. *Int. J. Energy Res.* 31: 119-134.

Performance of biogas turbine generators from wastewater treatment system of the dairy farm ⁽¹⁾

Hsiu-Wen Ou ⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ Tzong-Faa Shiao ⁽²⁾ and Ming-Shean Chou ⁽³⁾

Received: Jan. 7, 2020; Accepted: May 18, 2020

Abstract

This study aim to survey biogas power generati^or at the dairy farm and make a simple economic evaluation for assessing the feasibility of using biogas power generator. A micro gas turbine was used and the biogas was used as fuel. The rated output power of the generator was set at 30 kW. The results shewed that the annual power generation was 24.7 ± 1.4 kWh (range 23.0 ~ 27.3 kWh); the annual power consumption of the pre-treatment facility was 3.6 ± 0.2 kWh (range 3.3 ~ 3.9 kWh). The power consumption divided by the amount of electricity generated was $14.7 \pm 0.9\%$ (range 12.7 ~ 15.9%). The annual outside temperature was $23.7 \pm 4.7^\circ\text{C}$ (range 16.4 ~ 29.4°C). The CH₄ concentration in biogas was $57.9 \pm 2.1\%$ (55.2 ~ 62.0%) and the CO₂ concentration was $29.3 \pm 2.8\%$ (range 24.4 ~ 33.1%). The average thermal efficiency was $20.8 \pm 0.8\%$ (range 19.6 ~ 22.0%), and the biogas consumption was 373.3 ± 12.7 L/min (range 350.5 ~ 400.5 L/min). Generator consumed an average of 0.83 ± 0.03 m³ (range 0.77 ~ 0.88 m³) of biogas to generate 1 kWh electricity. During the whole test, the total power generation was 33,942 kWh, and the income was about 172,676 NT\$. A total of 18,091 kg CO₂e emissions was reduced. Biogas as fuel power generati^or can reduce both carbon emissions and consumption of other energy sources. It was worthy of promotion to farmers.

Key words: Biogas, Micro gas turbine, Biogas power generation, Thermal efficiency, Dairy farm.

(1) Contribution No. 2638 from Livestock Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

(2) Animal Industry Division, COA-LRI, Tainan 71246, Taiwan, R. O. C.

(3) Institute of Environmental Engineering, National Sun Yat-sen University, Kaohsiung 80424, Taiwan, R. O. C.

(4) Corresponding author, E-mail: hwou@mail.tlri.gov.tw.