

生長肥育豬飼養於水簾式豬舍對生長性能及 廢水處理水質之影響⁽¹⁾

蘇天明⁽²⁾⁽³⁾ 翁義翔⁽²⁾ 鍾承訓⁽²⁾ 劉威志⁽²⁾ 蕭庭訓⁽²⁾

收件日期：111 年 8 月 18 日；接受日期：112 年 2 月 4 日

摘 要

本研究旨在探討將生長肥育豬飼養於糞尿溝式水簾豬舍，對豬隻生長性能及對廢水經厭氧處理後水質和沼氣產量的影響。試驗期間使用平均體重 23 – 120 kg 的 LD (Landrace ♀ × Duroc ♂) 肉豬 64 頭，飼糧及飲用水皆採任食。每週以經過厭氧發酵的處理水沖洗糞尿溝 2 次，將原廢水儲存於儲水槽中，每日自動控制進水 500 L 於容積 10 m³ 之直立式厭氧槽。厭氧處理系統穩定後，每 2 週採集糞尿溝沖洗水、原廢水、厭氧後上澄液及厭氧槽混合液分析水質，測定沼氣產量與成分。豬隻肥育期在糞尿溝沖洗前及沖洗後，採集豬舍內水簾端 (P1)、豬舍第 2 – 3 欄間 (P2)、豬舍內風扇端 (P3) 及豬舍外風扇端 (P4) 空氣樣品測定氨氣濃度。結果顯示，試驗期間豬隻增重、採食量及飼料效率(gain/intake)分別為 0.90 kg/day/head、2.24 kg/day/head 及 0.40。糞尿溝沖洗後 P2 和 P3 的氨濃度較沖洗前為低 ($P < 0.05$)。試驗期間平均沼氣產量為 3,380 L/day，沼氣中甲烷及二氧化碳濃度分別為 62.0% 及 25.6%，分析厭氧槽混合液發現，其銅和鋅濃度皆顯著地較原廢水為高。綜上，建議定期清理糞尿溝及排除厭氧槽污泥，以維持豬舍內空氣品質，降低銅和鋅蓄積。

關鍵詞：糞尿溝、養豬場、水簾式豬舍。

緒 言

農政單位鑒於畜牧廢棄物的污染問題日益受到重視，從民國 79 年開始建立以現今行政院農業委員會畜產試驗所 (以下簡稱畜試所) 及其附屬單位為主之輔導體系，輔導養豬場設置三段式廢水處理設施，而當時豬舍型式以實地面為主。在當前水資源欠缺及水污染防治費徵收等因素驅使下，節水飼養是養豬產業永續經營的趨勢。蘇等 (2016, 2018a) 進行實地面、部分條狀地面及全條狀地面等 3 種不同地面結構豬舍用水量與廢水量進行比較，結果豬隻飼養於部分條狀及全條狀地面豬舍，皆較飼養於實地面豬舍具較佳的節水減廢效果。

三段式處理在厭氧階段會有沼氣產生，沼氣含甲烷、二氧化碳及微量的硫化氫及水氣，政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 報告指出，甲烷造成溫室效應的程度為二氧化碳之 25 倍，顯見其對氣候變遷的影響，而甲烷亦為生質能之一，若妥善規劃加以利用，可降低溫室氣體排放量又可作為替代能源之效益。Harasimowicz *et al.* (2007) 指出，沼氣為有機物質經由厭氧發酵過程被微生物分解所產生的氣體，尤其是畜牧廢水、農業殘餘物、家庭污水及垃圾掩埋場等。Lusk (1998) 指出，沼氣生成速率受發酵溫度、滯留時間及微生物族群等影響，每磅的化學需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 可產生 5.6 立方呎的甲烷，而沼氣中甲烷含量在 55 – 80%。Rasi *et al.* (2007) 及 Harasimowicz *et al.* (2007) 指出，沼氣含有 55 – 65% CH₄、30 – 45% CO₂ 和微量的硫化氫 (H₂S) 及水氣，熱值 (calorific value) 在 4,800 – 6,900 kcal/m³。行政院環境保護署 (2019) 公告養豬廢水放流水標準，其 COD、生化需氧量 (biochemical oxygen demand, BOD) 及懸浮固體 (suspended solid, SS) 分別不得大於 600、80 及 150 mg/L，pH 值須在 6 – 9 範圍內。行政院環境保護署 (2018) 從民國 106 年開始徵收畜牧業水污染防治費，以放流水的 COD 及 SS 濃度訂定費率，因此降低畜牧業排放水的 COD 及 SS 濃度可減少水污費支出。蘇等 (2018b) 將平均體重 52.9 ± 1.8 kg 的 LD 肉豬飼養於代謝架上，每日收集糞便及尿液後混合，模擬全條狀地面依重量比加入 1 : 1 的沖洗水後，注入有效容積 90 L 的直立式厭氧槽，水力停留時間 (hydraulic retention time, HRT) 分別為

(1) 行政院農業委員會畜產試驗所研究報告第 2733 號。

(2) 行政院農業委員會畜產試驗所經營組。

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

20 日及 30 日。結果 HRT 20 日組的上澄液 COD、總氮 (total nitrogen, TN)、銨態氮 (ammonium nitrogen, $\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和總磷 (total phosphorus, TP) 濃度皆顯著地較 HRT 30 日組為高, HRT 30 日組的沼氣、甲烷和二氧化碳產量, 以及電導度與銨和鉀濃度皆較 HRT 20 日組為高 ($P < 0.05$)。蘇等 (2018b) 指出, 厭氧處理 HRT 越長 (HRT 20 日 vs. HRT 30 日), 上澄液的 COD 濃度越低, 且每日沼氣產量較少 (HRT 20 日 vs. HRT 30 日 = 5.78 vs. 4.84 L/d; $P < 0.05$), 此與每日廢水注入量較少有關係, 而在厭氧槽污泥量保持固定的模式下, HRT 越長廢棄污泥的銨和鉀濃度及電導度越高。

本試驗為因應夏季氣溫升高可能影響豬隻採食與增重, 以及廢水與氨氣排放衍生之鄰避效應等因素, 將生長肥育豬飼養於高床水簾糞尿溝式肉豬舍, 探討對豬隻生長性能、處理水再利用、沼氣產量及氨氣排放等之影響。

材料與方法

I. 試驗動物及處理

- (i) 試驗在 2019 年 2 月 15 日至 6 月 6 日間進行, 將平均體重 22.6 ± 5.1 kg 的 LD (Landrace ♀ × Duroc ♂) 肉豬 64 頭飼養於高床水簾密閉糞尿溝式肉豬舍, 平均分飼於 8 欄 (長 × 寬 = 4 m × 2.3 m = 9.2 m²/欄)、每欄飼養 8 頭, 豬舍床面鋪設預鑄鋼筋混凝土板, 每頭豬擁有 1.15 m² 飼養面積。飼糧及飲用水皆採任食, 飼糧參照 NRC (1998) 推薦的生長期與肥育期豬隻營養需要量調製 (表 1), 在豬隻平均體重約 120 kg 時結束生長試驗。

表 1. 實驗飼糧組成

Table 1. The compositions of experimental diet (as fed basis)

Item	Growing period	Finishing period
Ingredients	----- % -----	
Corn meal, CP 7.8%	64.25	73.32
Soybean meal, CP 43.8%	26.30	19.00
Wheat bran	3.00	3.00
Limestone, pulverized	1.20	1.00
Dicalcium phosphate	1.30	1.00
Choline chloride, 50%	0.10	0.08
Molasses	2.00	2.00
Salt	0.40	0.40
Soybean oil	1.20	—
Vitamin premix ¹	0.10	0.10
Mineral premix ²	0.15	0.10
Total	100.00	100.00
Calculated value		
Digestible energy, kcal/kg	3,410	3,369.00
Crude protein, %	17.09	15.16
Cu, mg/kg	15.8	11.5
Zn, mg/kg	98.0	85.9

¹ Vitamin premix provided per kilogram of diet as following: Vitamin A, 6000 IU; Vitamin D₃, 800 IU; Vitamin B₁₂, 0.02 mg; Vitamin E, 20 IU; Vitamin K₃, 4 mg; Vitamin B₁, 4 mg; Pantothenic acid, 16 mg; Niacin, 30 mg; Pyridoxine, 1 mg; Folic acid, 0.5 mg; Biotin, 0.1 mg.

² Mineral premix provided per kilogram of diet as follows: Fe (FeSO₄ · 7H₂O), 140 mg; Cu (CuSO₄ · 5H₂O), 7 mg; Mn (MnSO₄), 20 mg; Zn (ZnO), 70 mg; I (KI), 0.45 mg.

- (ii) 豬隻於試驗開始時磅重, 而後每 2 週磅重 1 次; 以欄為單位在豬隻平均體重達 100 kg 後, 每週磅重 1 次, 記錄飼糧採食量, 計算生長性能, 並調查試驗期間豬隻腳蹄損傷情形。
- (iii) 試驗豬隻飼養於畜試所經營組豬場內, 豬隻之使用、飼養及實驗內容, 經「畜試所實驗動物照護及使用小組」審查同意 (畜試動字第 108 — 24 號)。

- II. 每週 2 次 (週一及週四) 以經過厭氧的處理水沖洗糞尿溝, 沖洗後將未經固液分離之原廢水儲存於儲水槽中。應用可編程邏輯控制系統 (programmable logic controller, PLC) 自動控制進出水於容量 10 噸之直立式厭氧槽, 每日進出水量各 500 L, 即厭氧處理 HRT 為 20 日, 操作流程如下:
- (i) 進水前 30 分鐘: 停止直立式厭氧槽內 2 HP 攪拌器運作。
 - (ii) 進水前 2 分鐘: 以電動球閥輔以液面控制器自動排出直立式厭氧槽內上澄液, 抽入既有的臥置式處理系統, 再經厭氧處理後供為循環沖洗糞尿溝用。
 - (iii) 進水前 30 秒至進水後 30 秒: 啟動直立式厭氧槽內 2 HP 及儲水槽內 0.5 HP 附設之攪拌器。
 - (iv) 進水: 以 0.5 HP 污泥馬達輔以液面自動控制器, 將儲水槽中之原廢水抽入直立式厭氧槽。
 - (v) 進水後: 每 2 小時自動啟動直立式厭氧槽內附設之 2 HP 攪拌器 2 分鐘, 並於翌日進水前 30 分鐘停止攪拌器運作。
- III. 系統穩定後, 每 2 週採集沖洗糞尿溝之沖洗水、原廢水、厭氧後上澄液及進水後厭氧槽混合液, 進行氫離子濃度指數 (pH value)、電導度 (electrical conductivity, EC) 及 COD、總固形物 (total solids, TS)、揮發性固形物 (volatile solids, VS)、TN、TP、鉀 (potassium, K)、銅 (copper, Cu) 及鋅 (zinc, Zn) 濃度分析。
- IV. 空氣樣品採集: 豬隻肥育期每次糞尿溝沖洗前及沖洗後, 分別採集豬舍中間走道、距離床面 100 cm 處之水簾端 (P1)、豬舍中間 (P2; 豬舍第 2 欄與第 3 欄之隔間欄杆處)、豬舍內風扇端 (P3) 及豬舍外風扇端 (P4) 空氣樣品測定氨氣濃度。
- V. 沼氣產量及成分分析: 系統穩定後每週測定沼氣產量 3 次, 並採集沼氣分析其成分 1 次。
- VI. 分析方法
- (i) pH 值、EC 及 COD 濃度: 分別依照行政院環境保護署公告之 NIEA W424.53A (行政院環境保護署環境檢驗所, 2019a)、NIEA W203.51B (行政院環境保護署環境檢驗所, 2000) 及 NIEA W515.55A (行政院環境保護署環境檢驗所, 2018) 方法分析之。
 - (ii) TS 及 VS 濃度: 依照行政院環境保護署公告之 NIEA W210.58A (行政院環境保護署環境檢驗所, 2013) 方法分析之。
 - (iii) 總氮: 參照行政院環境保護署公告之 NIEA W423.52C (行政院環境保護署環境檢驗所, 2004) 方法計算之。水中總氮濃度 = 水中硝酸鹽氮濃度 + 水中亞硝酸鹽氮濃度 + 水中凱氏氮濃度。水中硝酸鹽氮、亞硝酸鹽氮及凱氏氮之測定, 分別參照行政院環境保護署環境檢驗所 NIEA W419.51A (2006a)、NIEA W418.53C (2019b) 及 NIEA W451.51A (2006b) 方法分析之。
 - (iv) 總磷: 參照行政院環境保護署公告之 NIEA W423.52C27.53B (行政院環境保護署環境檢驗所, 2010) 方法分析之。
 - (v) 鉀、銅及鋅: 參考蘇等 (2020) 方法, 將水樣定量 50 mL 後加入 3 N 的鹽酸 10 mL, 以鍍玻璃覆蓋置 350℃ 電熱板進行酸解後, 以原子吸收光譜儀 (Spectrophotometer Z8100, Hitachi, Japan) 分析之。
 - (vi) 空氣樣品: 利用北川式ガス檢知管 (檢測範圍 0.2 – 20 ppm; 光明理化學工業株式會社, 神奈川縣, 日本) 測定氨氣濃度。
 - (vii) 沼氣產量: 每週一 09:00 安裝氣體流量計 (Shinagawa Corporation, Japan) 並記錄讀數後, 每週二、三、四同時間測定沼氣產量各 1 次。
 - (viii) 沼氣成分: 沼氣樣品以氣相層析儀—熱導偵測器 (Thermo Fisher Scientific, Inc, USA) 分析沼氣中甲烷及二氧化碳百分比含量。

VII 統計分析

試驗豬隻生長性能、沼氣產量、比沼氣產量及沼氣成分以 Excel 2019 計算平均值。其他分析資料利用 SAS 統計分析套裝軟體的一般線性模式程序 (General linear model procedure) 進行變方分析 (SAS, 2002), 以 LSMEANS 統計模式估計各處理組的最小平方平均值及標準機差, 再以鄧肯氏新多變域測定法 (Duncan's New Multiple Range Test), 檢定各處理組間的差異顯著性 ($P < 0.05$)。

結果與討論

I. 豬隻生長性能

本試驗豬隻生長期 (平均體重 23 kg 至 65.5 kg) 與肥育期 (平均體重 65.5 kg 至 119 kg) 分別餵飼消化能、

粗蛋白質、銅及鋅含量為 3,410 與 3,369 kcal/kg、17.09 與 15.16%、15.8 與 11.5 mg/kg 及 98.0 與 85.9 mg/kg 飼糧 (表 1)，消化能與粗蛋白質含量符合 NRC (1998) 推薦體重 20 – 100 kg 豬隻的營養需要量，銅和鋅含量也低於國家標準家畜禽配合飼料 (2010) 規定，生長期與肥育期分別為 25 和 110 ppm 與 25 和 100 ppm 的最高限量。試驗期間的增重、採食量及飼料效率分別為 0.90 kg/head/day、2.24 kg/head/day 及 0.40 (表 2)。過去文獻分別在熱季及涼季使用平均體重約 48 kg 與 39 kg 的 LD 肉豬，群飼在開放式豬舍至平均體重約 115 kg，結果熱季的增重、採食量及飼料效率分別為 0.70 kg/head/day、2.28 kg/head/day 及 0.31 (蘇等, 2016)，涼季則為 0.72 kg/head/day、2.20 kg/head/day 及 0.33 (蘇等, 2018a)，本試驗豬隻增重及飼料效率較蘇等 (2016) 與蘇等 (2018a) 皆佳。蘇等 (2016)、蘇等 (2018a) 與本試驗皆於同棟豬舍進行，蘇等 (2016) 與蘇等 (2018a) 係採取開放式、每欄飼養 6 頭生長肥育豬、每頭豬擁有 1.5 m² 飼養空間，而本試驗係採取密閉水簾進行，每欄飼養 8 頭生長肥育豬、每頭豬擁有 1.15 m² 飼養空間，皆符合行政院農業委員會 (2021) 畜牧場主要設施設置標準規定，肉豬飼養空間必須在 1 – 3 m²/pig。研究指出豬隻的增重和採食量會隨著飼養空間減少而降低 (Flohr *et al.*, 2016; Thomas *et al.*, 2017)。本試驗豬隻試驗開始時體重及飼養空間，明顯較蘇等 (2016) 與蘇等 (2018a) 為小，而飼料效率較佳，推測與豬隻飼養在密閉水簾豬舍內環境溫度較恆定有關。此外，試驗期間未發現豬隻有腳蹄損傷情形。

表 2. 試驗豬隻生長性能

Table 2. The growth performance of experimental pigs

Items	Mean	SD
Age, day		
Initial	87.7	5.6
End of growing period	141.7	5.6
End of finishing period	195.1	7.8
Body weight, kg		
Initial	22.6	5.1
End of growing period	65.5	9.8
End of finishing period	119.1	7.0
Gain, kg/day		
Growing period	0.78	0.12
Finishing period	1.01	0.13
Overall	0.90	0.08
Intake, kg/d		
Growing period	1.72	0.15
Finishing period	2.80	0.40
Overall	2.24	0.19
Feed efficiency, gain/intake		
Growing period	0.46	0.08
Finishing period	0.36	0.06
Overall	0.40	0.04

II. 各處理階段水質成分

試驗糞尿溝沖洗係使用經過直立式發酵槽處理後的上澄液、再經過臥置式處理設施厭氧處理後的處理水，直立式發酵槽系統穩定後，採集沖洗水、原廢水、厭氧後上澄液及進水後厭氧槽攪拌液樣品進行水質分析，共 8 次。沖洗水分析結果，其平均值分別為 pH 值 7.69、EC 6.57 mS/cm、COD 838 mg/L、TS 2,410 mg/L、VS 840 mg/L、TN 224 mg/L、TP 186 mg/L、K 360 mg/L、Cu 0.16 mg/L 和 Zn 0.27 mg/L (表 3)。原廢水各項水質濃度皆顯著地較厭氧後上澄液為高 ($P < 0.05$)，而厭氧處理對 COD、TS、VS、TN 及 TP 的去除率，則分別為 86.84、77.27、85.34、81.80 及 85.04% (表中未顯示)。本試驗為了解厭氧處理期間銅和鋅的蓄積情形，在試驗期間未排泥。採集直立式厭氧槽加入原廢水並經攪拌 2 分鐘後的樣品進行水質分析，發現其 Cu 和 Zn 濃度 (16.55 和 26.07 mg/L) 皆顯著地較原廢水 (2.03 和 17.81 mg/L) 為高 ($P < 0.05$)，顯示在直立式厭氧槽系統中 Cu 和 Zn 有累

積情形。

表 3. 各處理階段廢水水質成分

Table 3. Water qualities of pig wastewater at different treatment stage

Items	Water A ¹	Water B	Water C	Water D	SE
pH value	7.69 ^a	7.25 ^c	7.61 ^{ab}	7.47 ^b	0.05
EC, mS/cm	6.57 ^b	9.57 ^a	10.4 ^a	10.1 ^a	0.41
----- mg/L -----					
COD	838 ^c	21,000 ^a	2,790 ^c	12,900 ^b	704
TS	2,410 ^d	20,100 ^a	4,570 ^c	12,100 ^b	609
VS	840 ^c	13,500 ^a	1,980 ^c	7,620 ^b	436
TN	224 ^d	3,600 ^a	662 ^c	1,530 ^b	78
TP	186 ^c	2,000 ^a	303 ^c	1,420 ^b	70
K	360 ^c	1,100 ^a	785 ^b	1,090 ^a	20
Cu	0.16 ^c	2.03 ^b	0.28 ^c	16.6 ^a	0.45
Zn	0.27 ^c	17.8 ^b	1.03 ^c	26.1 ^a	0.81

¹ The Water A, Water B, Water C, and Water D were the manure ditch flushing water, raw wastewater, anaerobic supernatant and anaerobic tank mixture, respectively.

^{a, b, c, d} Means with in same row without the same superscripts differ ($P < 0.05$).

III. 豬舍糞尿溝沖洗前、後氨氣濃度之比較

豬隻肥育期在豬舍沖洗糞尿溝前及沖洗後各 15 分鐘，分別以氨檢知管 (檢測範圍 0.2 — 20 ppm)，測定豬舍走道中間距離地面 1 公尺高的水簾端 (P1)、豬舍第 2 欄與第 3 欄之隔間欄杆處 (P2)、豬舍內風扇端 (P3) 及豬舍外風扇端 (P4) 等 4 個點的氨氣濃度 (表 4)，結果沖洗前 P3 的氨濃度顯著地較 P1、P2 及 P4 皆高 ($P < 0.05$)，而沖洗後 P3 和 P4 的氨濃度則較 P1 及 P2 為高 ($P < 0.05$)。在沖洗前、後的比較方面，糞尿溝沖洗前 P2 (0.53 vs. 0.25 ppm) 和 P3 (2.36 vs. 0.77 ppm) 的氨濃度顯著地較豬舍沖洗後為高 ($P < 0.05$)，而 P1 和 P4 的氨濃度數值也較豬舍沖洗後為高，惟差異未達顯著。荷蘭社會和經濟委員會 (Sociaal Economische Raad, SER) 規定，員工在氨濃度 20 ppm 環境下的暴露時間不得超過 8 小時，在 50 ppm 或更高的情況下暴露時間不得超過 15 分鐘。Donham *et al.* (1989) 建議，工作人員不要暴露在超過 7 ppm 之氨濃度環境下；Reynolds *et al.* (1996) 也指出，牧場工作人員暴露之氨氣濃度限值為 7.5 ppm；Wathes (1998) 建議動物飼養環境氨濃度不超過 20 ppm。張等 (1997) 調查國內豬場環境中氨氣濃度低於 5 ppm，而行政院環境保護署 (2007) 公告畜牧場周界氨氣濃度限值必須低於 1 ppm。本試驗在水簾式密閉豬舍進行採固定式風扇排氣，以糞尿溝沖洗前豬舍內風扇端 (P3) 的氨濃度 2.36 ppm 最高，且較前述研究 (Donham *et al.*, 1989; Reynolds *et al.*, 1996; Wathes, 1998) 皆低，而 P4 點不論豬舍沖洗前、後 (0.66 vs. 0.62 ppm)，皆較行政院環境保護署 (2007) 公告的 1 ppm 氨濃度限值為低。

表 4. 豬舍沖洗前後氨氣濃度之比較

Table 4. Comparison of ammonia concentration (ppm) before and after flushing in pig house

Items	Before flushing	After flushing	SE
P1	0.18 ^b	0.10 ^b	0.05
P2	0.53 ^{bx}	0.25 ^{by}	0.06
P3	2.36 ^{ax}	0.77 ^{ay}	0.33
P4	0.66 ^b	0.62 ^a	0.08
SE	0.24	0.08	

¹ P1, P2, P3 and P4 were the wet-pad side, the 2nd to 3rd pen, fan side in the house and fan side outside the house, respectively.

^{a, b} Means with in same column without the same superscripts differ ($P < 0.05$).

^{x, y} Means with in same row without the same superscripts differ ($P < 0.05$).

IV. 沼氣產量及其成分分析

直立式厭氧槽的沼氣產量、沼氣甲烷濃度及二氧化碳濃度，分別為 $3,380 \pm 189$ L/d、 $62.0 \pm 2.18\%$ 及 $25.6 \pm 1.51\%$ (表 5)，估算每立方公尺槽體的沼氣、甲烷與二氧化碳產量分別約為 338 ± 19 、 209 及 86 L/day，參試豬隻 64 頭，估算每頭豬的沼氣、甲烷與二氧化碳產量則為 52.8 、 32.7 及 13.5 L/day。蘇等 (2018b) 將豬隻飼養於代謝架收集每日的豬隻糞便及尿液後混合，依 1:1 (w/w) 比例加入沖洗水調製原廢水。原廢水調製完成後注入直立式厭氧發酵模槽，水力停留時間分別為 20 天及 30 天，結果甲烷濃度介於 $60.5 - 62.7\%$ 間，與本試驗所得結果 ($62.0 \pm 2.18\%$) 相近。

表 5. 直立式發酵槽沼氣產量及其成分

Table 5. The production and composition for the biogas from of the experimental vertical anaerobic tank

Items	Mean	SD
Growing- finishing pig, head	64	
Vertical anaerobic tank volume, m ³	10	
Biogas production, L/d	3,380	189
Biogas compositions, %		
Methane	62.0	2.18
Carbon dioxide	25.6	1.51
Production ¹ , L/m ³ /d		
Biogas	338	19
Methane	209	—
Carbon dioxide	86	—
Production ² , L/pig/d		
Biogas	52.8	2.95
Methane	32.7	—
Carbon dioxide	13.5	—

¹ Estimated value, Production = biogas production \div 10; Methane production = methane concentration in biogas \div 10; Carbon dioxide production = carbon dioxide concentration in biogas \div 10.

² Estimated value, Production = biogas production \div 64; Methane production = methane concentration in biogas \div 64; Carbon dioxide production = carbon dioxide concentration in biogas \div 64.

在比沼氣產量 (specific biogas yield) 及比甲烷產量 (specific methane yield) 方面，COD、TS 和 VS 的比沼氣產量分別為 319 ± 50 mL/g COD/day、 333 ± 51 mL/g TS/day 及 498 ± 85 mL/g VS/day，比甲烷產量則為 198 ± 33 mL/g COD/day、 206 ± 32 mL/g TS/day 及 309 ± 54 mL/g VS/day (表 6)。本試驗使用的原廢水 TS 含量約 20,000 mg/L (表 3)，比沼氣產量及比甲烷產量 333 及 206 mL/g TS/day，與蕭等 (2016) 使用 TS 含量 2.0% 的雞糞混合液進行厭氧消化，獲得的比沼氣產量 (335 mL/g TS/day) 及比甲烷產量 (226 mL/g TS/day) 結果相近，而 VS 的比沼氣產量及比甲烷產量為 498 及 309 mL/g VS/day，也和蕭等 (2016) 試驗所得的比沼氣產量 (471 mL/g VS/day) 及比甲烷產量 (317 mL/g VS/day) 相近，但較 Bonmati *et al.* (2001) 在實驗室以養豬廢水控制厭氧槽溫度在 35°C 下操作所得結果比甲烷產量 403 mL/g VS/day，以及 Chae *et al.* (2008) 的研究 437 mL/g VS/day 皆低。

本試驗 COD 的比甲烷產量為 198 mL/g COD/day，與郭等 (1995) 每公克 COD 約可產生 0.21 L 甲烷之結果相近，惟較 McCarty *et al.* (1969) 提出的每公克 COD 約可產生 0.35 L 甲烷之理論值為少。諸多因素皆可能影響甲烷產量，IPCC 為了估算甲烷產量，提出了 Van't Hoff - Arrhenius 方法並以年平均溫度估算甲烷產量 (Dong *et al.*, 2006)，然 Habtewold *et al.* (2018) 指出，廢水中產甲烷群落的生長和活動可能是影響甲烷產量的關鍵因素，而這些微生物動態又會受到槽體內溫度的影響，且槽體內溫度也會隨著儲存時間而變化 (Rennie *et al.*, 2018)。因此 IPCC (Gavrilova *et al.*, 2019) 建議甲烷產量除了依國家別按月估算外，也必須將處理槽內溫度和儲存排空頻率 (storage emptying frequency) 納入考量，此外廢水成分中對產甲烷菌和抑制產甲烷的化合物 (Batstone *et al.*, 2002) 含量，也是影響甲烷產量的重要因素。上述因素皆可能為本試驗甲烷產量與 McCarty *et al.* (1969) 提出的理論值差異的原因。

表 6. 直立式發酵槽比沼氣產量及比甲烷產量

Table 6. Specific biogas yield and specific methane yield of the experimental vertical anaerobic tank

Items	Mean	SD
Biogas production, L/d	3,380	189
Methane concentration, %	62.0	2.2
Influent, L/d	515	10
Specific biogas yield ¹ , mL/g/d		
COD	319	50
TS	333	51
VS	498	85
Specific methane yield ² , mL/g/d		
COD	198	33
TS	206	32
VS	309	54

¹ Specific biogas yield = biogas production (mL/day) ÷ inflow wastewater (L/day) ÷ COD, TS, VS concentrations of inflow wastewater (mg/L) × 0.001 (unit conversion).

² Specific methane yield = biogas production (mL/day) × methane concentration (%) ÷ influent (L/day) ÷ COD, TS, VS concentrations of inflow wastewater (mg/L) × 0.001 (unit conversion).

結 論

- I. 從厭氧槽攪拌液樣品分析結果發現，其銅和鋅濃度皆顯著地較原廢水為高，顯示銅和鋅在直立式發酵槽系統中有累積情形。
- II. 比較糞尿溝沖洗前與沖洗後，豬舍內與豬舍外的氨氣濃度發現，豬舍沖洗前豬舍中間（豬舍第 2 欄與第 3 欄之隔間欄杆處）和風扇端的氨濃度較豬舍沖洗後顯著為高。
- III. 建議適時排出污泥予以曬乾後資源化利用，避免因污泥蓄積導致銅、鋅含量過高，而高床密閉豬舍仍應定期清理糞尿，以維持工作人員健康與豬舍內空氣品質。

參考文獻

- 行政院農業委員會。2021。畜牧場主要設施設置標準。中華民國 110 年 12 月 30 日修正公告。
- 行政院環境保護署。2007。空氣污染防治法規—固定污染源空氣污染物排放標準。中華民國 96 年 9 月 11 日行政院環境保護署環署空字第 0960068131 號令修正。
- 行政院環境保護署。2018。事業及污水下水道系統水污染防治費收費辦法。中華民國 107 年 12 月 26 日修正。
- 行政院環境保護署。2019。放流水標準。中華民國 108 年 4 月 29 日修正。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2000。水中導電度測定方法—導電度計法 (NIEA W203.51B)。中華民國 89 年 11 月 23 日環署檢字第 70017 號公告。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2004。水中總氮檢測方法 (NIEA W423.52C)。中華民國 93 年 8 月 9 日環署檢字第 0930057400 號公告。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2006a。水中硝酸鹽氮檢測方法—分光光度計法 (NIEA W419.51A)。中華民國 95 年 8 月 8 日環署檢字第 0950062980 號公告。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2006b。水中凱氏氮檢測方法 (NIEA W451.51A)。中華民國 95 年 3 月 31 日環署檢字第 0950025578 號公告。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2010。水中磷檢測方法—分光光度計／維生素丙法 (NIEA W427.53B)。中華民國 99 年 9 月 15 日環署檢字第 0990084224 號公告。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2013。水中總溶解固體及懸浮固體檢測方法—103 ~ 105 °C 乾燥 (NIEA

- W210.58A)。中華民國 102 年 1 月 15 日環署檢字第 1020004998 號公告。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2018。水中化學需氧量檢測方法－重鉻酸鉀 (NIEA W515.55A)。中華民國 107 年 11 月 22 日環署授檢字第 1070007386 號。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2019a。水之氫離子濃度指數 (pH 值) 測定方法－電極法 (NIEA W424.53A)。中華民國 108 年 1 月 22 日環署授檢字第 1080000393 號公告。
- 行政院環境保護署環境檢驗所。2019b。水中亞硝酸鹽氮檢測方法－比色法 (NIEA W418.54C)。中華民國 108 年 7 月 30 日環署授檢字第 1080004541 號公告。
- 張靜文、鍾弘、黃金鳳、蘇慧貞。1997。養豬場作業環境暴露危害研究。勞工安全衛生研究季刊 5(3)：1-22。
- 國家標準配合飼料 (家畜、家禽用)。2010。經濟部 99 年 5 月 18 日經授標字第 09920050420 號公告。
- 郭猛德、沈添富、曾四恭。1995。固液分離與攪拌對厭棄處理豬糞廢水之污泥產量與性質的影響。中畜會誌 24(2)：191-204。
- 蕭庭訓、蘇天明、陳水財、黃裕益、程梅萍、沈韶儀。2016。雞糞厭氧消化之沼氣產量評估。農業機械學刊 25(1)：1-11。
- 蘇天明、翁義翔、鍾承訓、鄭閔謙、蕭庭訓、程梅萍。2016。地面結構對熱季豬隻生長性能及豬舍用水量、廢水量之影響。畜產研究 49(1)：26-34。
- 蘇天明、翁義翔、鍾承訓、蕭庭訓、程梅萍。2018a。地面結構對涼季豬隻生長性能與豬舍廢水量及水質之影響。畜產研究 51(1)：75-83。
- 蘇天明、翁義翔、鍾承訓、蕭庭訓、劉威志、廖仁寶。2018b。高床水簾豬舍之廢水及臭味處理模式評估。行政院農業委員會畜產試驗所 107 年度研究報告。
- 蘇天明、鍾承訓、蕭庭訓、程梅萍。2020。三段式處理對不同濃度養豬廢水之處理效果。畜產研究 53(2)：82-90。
- Batstone, D. J., J. Keller, I. Angelidaki, S. V. Kalyuzhnyi, S. G. Pavlostathis, A. Rozzi, W. T. M. Sanders, H. Siegrist, and V. A. Vavilin. 2002. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Sci. Technol.* 45(10): 65-73.
- Bonmatí, A., X. Flotats, L. Mateu, and E. Campos. 2001. Study of thermal hydrolysis as a pretreatment to mesophilic anaerobic digestion of pig slurry. *Water Sci. Technol.* 44 (4): 109-116.
- Chae, K. J., A. Jang, S. K. Yim, and I. S. Kim. 2008. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresour. Technol.* 99: 1-6.
- Dong, H., J. Mangino, T. A. McAllister, J. L. Hatfield, D. E. Johnson, M. Aparecida de Lima, and A. Romanovskaya. 2006. Emissions from livestock and manure management. In S. Eggleton *et al.* (Eds.), 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories pp. 10.7-10.82.
- Donham, K. J., P. Haglund, Y. Peterson, R. Rylander, and L. Belin. 1989. Environmental and health studies of farm workers in Swedish swine confinement buildings. *Brit. Ind. Med.* 46(1): 31-37.
- Flohr, J. R., M. D. Tokach, J. M. DeRouchey, J. C. Woodworth, R. D. Goodband, and S. S. Dritz. 2016. Evaluating the removal of pigs from a group and subsequent floor space allowance on the growth performance of heavy-weight finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 94: 4388-4400.
- Gavrilova, O., A. Leip, H. Dong, J. D. MacDonald, C. A. G. Bravo, B. Amon, R. B. Rosales, A. D. Prado, M. A. de Lima, W. Oyhantçabal, T. J. Weerden, Y. Widiawati, A. Bannink, K. Beauchemin, H. Clark, A. Leytem, E. Kebreab, N. M. Ngwabie, C. I. Opio, A. VanderZaag, and T. V. Vellinga. 2019. Emissions from livestock and manure management. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Agriculture, forestry and other land use, Vol. 4, pp. 10.49-10.73.
- Habtewold, J., R. Gordon, V. Sokolov, A. VanderZaag, C. Wagner-Riddle, and K. Dunfield. 2018. Targeting bacteria and methanogens to understand the role of residual slurry as an inoculant in stored liquid dairy manure. *Appl. Environ. Microbiol.* 84(7): 1-15.
- Harasimowicz, M., P. Orluk, G. Zakrzewska-Trznadel, and A. G. Chmielewski. 2007. Application of polyimide membranes for biogas purification and enrichment. *J. Hazard. Mater.* 144: 698-702.
- Lusk, P. 1998. Methane Recovery from Animal Manures: The Current Opportunities Casebook.
- McCarty, P., L. Beck, and P. S. Amant. 1969. Biological denitrification of wastewaters by organic materials. 24th Ind. Paper presented at the Waste Conf.
- National Research Council. 1998. Nutrient Requirements of Swine. 10th Revised. ed. Washington, D. C.
- Rasi, S., A. Veijanen, and J. Rintala. 2007. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. *Energy.* 32:

1375-1380.

- Rennie, T. J., R. J. Gordon, W. N. Smith, and A. C. VanderZaag. 2018. Liquid manure storage temperature is affected by storage design and management practices: A modelling assessment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 260: 47-57.
- Reynolds, S. J., K. J. Donham, P. Whitten, J. A. Merchant, L. F. Burneister, and W. J. Popenorf. 1996. Longitudinal evaluation of dose-response relationships for environmental exposures and pulmonary function in swine production workers. *Am. J. Ind. Med.* 29: 33-40.
- SAS. 2002. SAS procedure guide for personal computers. Version 6th ed. SAS Institute Inc. Cary, NC. U.S.A.
- SER, Wettelijke Grenswaarden Ammoniak. Available online: <http://www.ser.nl/nl/grenswaarden/ammoniak.aspx> (accessed on 20 July 2022).
- Thomas, L. L., R. D. Goodband, J. C. Woodworth, M. D. Tokach, J. M. DeRouchey, and S. S. Dritz. 2017. Effects of space allocation on finishing pig growth performance and carcass characteristics. *Transl. Anim. Sci.* 1: 351-357.
- Wathes, C. M. 1998. Aerial emissions from poultry production¹. *World's Poult. Sci.* 54(3): 241-251.

Effects of growing-finishing pigs in water-pad cooling pig house on growth performance and water quality of wastewater treatment ⁽¹⁾

Tein-Ming Su ⁽²⁾⁽³⁾ Yi-Hsiang Weng ⁽²⁾ Cheng-Hsun Chung ⁽²⁾ Wei-Zhi Liu ⁽²⁾ and Ting-Hsun Hsiao ⁽²⁾

Received: Aug. 18, 2022; Accepted: Feb. 4, 2023

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effects of raising growing-finishing pigs in a water-pad cooling pig house with manure ditch on the growth performance of pigs, biogas production and effluent quality after anaerobic treatment of wastewater. During the experiment, 64 LD pigs with an average body weight of 23 kg grew to 120 kg, and both diet and drinking water were given *ad libitum*. The manure ditch was washed twice a week with the anaerobic treated wastewater and the raw wastewater produced was stored in a water storage tank. The raw wastewater was automatically controlled into a 10 m³ vertical anaerobic reactor at a rate of 500 L/day. While the anaerobic treatment system was stabilized, the flushing water for manure ditch, raw wastewater, anaerobic treated wastewater and the mixture in the anaerobic reactor were collected every 2 weeks to analyze the water quality. The biogas production and compositions were also determined. During the finishing stage of pigs, the gas samples of manure ditch before and after flushing were collected to detect the ammonia concentration, and the sampling sites included wet-pad side (P1), the 2nd to 3rd pen (P2), fan side in the house (P3), and fan side outside the house (P4). The results showed that the weight gain, feed intake and feed efficiency of pigs were 0.90 kg/day/head, 2.24 kg/day/head and 0.40, respectively, during the experiment period. The ammonia concentrations of P2 before and after flushing were 0.53 and 0.25 ppm, and those of P3 were 2.36 and 0.77 ppm. The ammonia concentrations of gas samples after flushing were lower than those before flushing ($P < 0.05$). The average biogas production rate during the experimental period was 3,380 L/day. The concentrations of methane and carbon dioxide in the biogas were 62.0% and 25.6%, respectively. The results of analysis of the mixture of anaerobic reactor showed the copper and zinc concentrations were significantly higher than those of the raw wastewater. In conclusion, it is recommended to flush the manure ditch regularly and remove the sludge in the anaerobic reactor for the maintenance of the air quality in the pig house and reduction of copper and zinc accumulation.

Key words: Manure ditch type, Pig farm, Water-pad cooling pig house.

(1) Contribution No. 2733 from Livestock Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

(2) Livestock Management Division, COA-LRI, Tainan 71246, Taiwan, R. O. C.

(3) Corresponding author, E-mail: tmsu@mail.tlri.gov.tw.