

牛糞產製固態廢棄物衍生燃料及燃燒評估⁽¹⁾

歐修汶⁽²⁾ 蕭庭訓⁽²⁾ 劉威志⁽²⁾ 蘇天明⁽²⁾ 鍾承訓⁽²⁾⁽³⁾

收件日期：113 年 6 月 25 日；接受日期：114 年 4 月 15 日

摘 要

本研究於養牛場分別收集機械刮糞、水車式及斜篩式固液分離機處收集牛糞固形物，再以太陽能乾燥產製牛糞固態衍生燃料後，進行粒徑、熱值與燃燒排氣污染物（粒狀污染物、二氧化硫及氮氧化物）等性狀及成分分析。結果顯示牛床機械刮糞、水車式固液分離後與斜篩式固液分離後之牛糞固態衍生燃料粒徑大於 3.8 mm 以上者分別為 94.3、71.8 與 43.9%。其熱值則介於 3,974 – 4,195 kcal/kg 之間，具替代燃料利用之可行性。3 種來源之牛糞固態衍生燃料之 C (35.1 – 42.7%)、H (5.39 – 6.08%)、O (30.8 – 36%)、N (1.37 – 2.37%) 和 S (0.23 – 0.51%)。燃燒後其排氣管道中 SO₂、NO_x 及粒狀污染物校正後濃度值範圍分別為 (204 – 283 mg/Nm³)、(617 – 701 mg/Nm³) 及 (1,564 – 3,873 mg/Nm³)，僅 SO₂ 符合本國空氣污染物排放標準。故本研究建議，未來可藉由調整衍生燃料顆粒大小、添加輔助成分、改進爐體形狀、燃燒溫度和燃燒技術類型等方式，來改善與降低污染物濃度。

關鍵詞：牛糞、固態廢棄物衍生燃料、固液分離、熱值。

緒 言

牛糞尿廢水屬高濃度有機廢水，含纖維素、半纖維素、木質素，微生物難以分解 (Rico *et al.*, 2007)，且隨日糧及飼養階段（乾乳牛、泌乳牛、小牛）不同，其含量也隨之變化。Zhang *et al.* (2019) 提到牛糞的常見處理方法有直接施肥、堆肥化、厭氧消化、生化及熱化學處理。國內牛糞清除方式通常以清水直接沖洗、人工或機械刮除再沖洗，產生的廢水再以水車式及斜篩式固液分離機將固形物與液體分離，固形物堆肥化處理後回歸農地；分離液則以廢水處理系統處理後排放或資源化利用。固形物分離方式會影響固形物成分與粒徑，Hjorth *et al.* (2010) 指出，機械式固液分離設施廣泛被應用於亞洲，固液分離後之固形物粒徑大小或分離效果，則與選用固液分離機型式，如離心式、篩網式、螺旋擠壓式及篩網孔徑有關，顯示固形物分離方式會影響固形物成分與粒徑。Burton (2007) 利用擠壓、離心、過濾或過篩等機械式固液分離機，自廢水中取出固形物。

由於可用的石化原料逐年減少，且國際能源需求增加。近年來，國際能源價格明顯飆漲，致利用農業資材（生物質，biomass）生產的綠色能源日益受到重視，將牛糞材料產製成固態衍生燃料，充當鍋爐、區域熱供應、熱電共生廠、發電廠燃料，應該可以創造溫室氣體減量效益。吳及葛 (2001) 為因應我國垃圾處理策略，建立本土化的固態廢棄物衍生燃料 (refuse derived fuel, RDF) 技術，於民國 90 年建造完成處理量 200 kg/hr 之 RDF-5 之先導型實驗工廠，並已完成都市廢棄物及一般事業廢棄物（廢紙排渣）固態衍生燃料製造相關技術研究與測試。將動物糞便轉化為能量主要有兩種方法，一種是生化轉化 (biochemical conversion)，另一種是熱化學轉化 (thermochemical conversion) (Yuan *et al.*, 2017)。與生化轉化相比，熱化學轉化具有更高的效率、更短的反應時間和更優越的降解動物糞便的能力。熱化學轉化可進一步細分為燃燒 (combustion)、氣化 (gasification) 和熱解 (pyrolysis) (Cao *et al.*, 2014)。牛糞固形物屬生質能 (biomass energy)，常被發展中國家當作家庭燃料使用。Bhargava *et al.* (2004) 研究印度偏遠地區孟加拉，居民利用牛糞餅充當家庭烹煮燃料。Tsai and Liu (2015) 研究指出水牛糞便、肉牛糞及乳牛糞之熱值分別為 19.6、19.3 及 18.5 MJ/kg，含水率 80% 以上。國內亦有將牛糞固形物，製成活性碳產品，且品質上與市售活性碳產品相當 (鄭等, 2014)。固態衍生燃料產製方式，為將廢棄物經破碎、分選、乾燥、混合添加劑及成型等處理過程。Rico *et al.* (2007) 指出，牛糞固形物含纖維素且粒徑小，經乾燥後可直接進行粒狀或餅狀固態衍生燃料

(1) 農業部畜產試驗所研究報告第 2820 號。

(2) 農業部畜產試驗所畜產經營組。

(3) 通訊作者，E-mail: cschung@tlri.gov.tw。

產製。用生牛糞 (raw cow dung) 製成之顆料燃料相較其他農業剩餘生物質 (agricultural residue biomass) 顆料燃料，更具廣泛可利用性、低成本與較高之燃料特性 (Szymajda *et al.*, 2021)。

本研究利用牛床機械刮糞 (mechanical scraper, MS)、水車式固液分離機 (waterwheel solid- separator, WSS) 與斜篩式固液分離機 (inclined screen separator, ISS) 等方式取得之牛糞固形物，產製固態衍生燃料，期能使牛糞固形物轉化為可用生質能源，同步監測燃燒過程所排放的空氣污染物，如二氧化硫、氮氧化物及粒狀污染物，以了解產製之固態衍生燃料燃燒對環境的影響。

材料與方法

I. 試驗設備

燃燒爐 1 組 (圖 1)，其組成包括腳架、投料口、燃燒室、活動門、貯水層及排煙管道，總高度 405 cm，燃燒室內徑 50 cm 附有活動門，貯水層及排煙管道內徑與高分別為 70 與 152.5 cm 及 30 與 300.5 cm，距排煙管道頂端 65.5 cm 設直徑 10 cm 氣體採樣口。

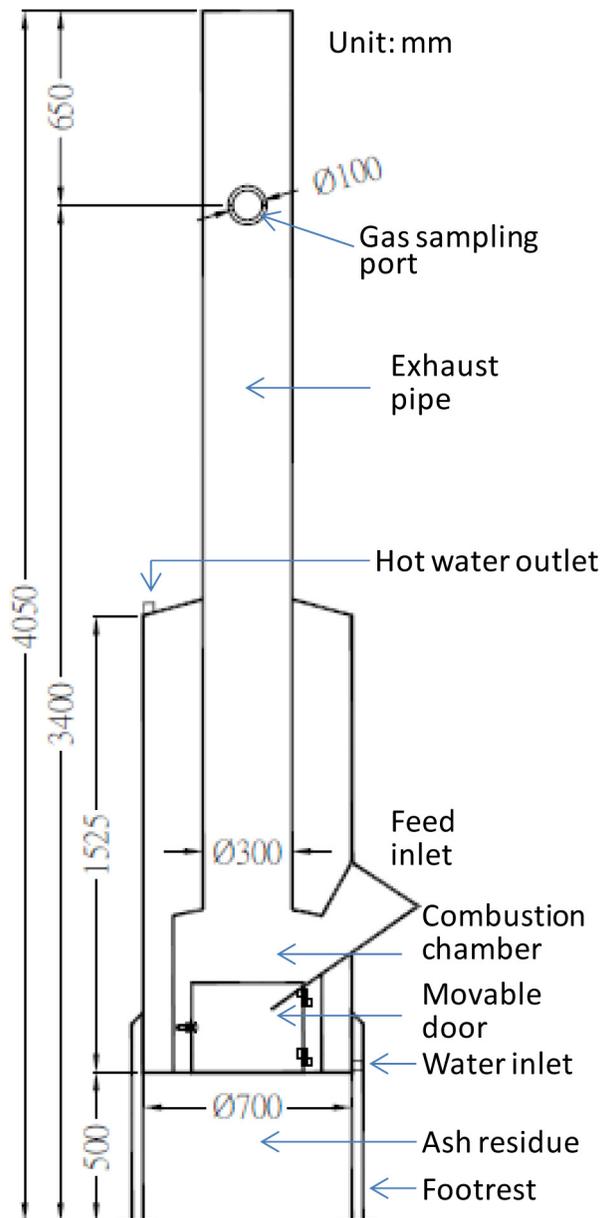


圖 1. 燃燒爐示意圖。

Fig. 1. A schematic diagram of combustion furnace.

II. 試驗材料

- (i) 牛糞固形物來源：試驗材料分別取自乳牛場床面機械刮除之牛糞固形物 (mechanical scraper solid, MS's)、沖洗牛床之廢水經水車式固液分離機附設擠壓機之牛糞固形物 (waterwheel solid- separator solid, WSS's) 與經水車式固液分離液再以斜篩式固液分離機附設擠壓機之牛糞固形物 (inclined screen separator solid, ISS's) (圖 2) (斜篩式固液分離機之分離固體為經第二次分離之固體，已非原牛糞尿第一次分離之固體，因此造成粒徑較小及其他成分差異)。分析組成成分包括水分、灰分、有機質、總氮、銅及鋅等。



圖 2. 不同分離型態之牛糞固形物採樣點 (a. 機械刮除、b. 水車式固液分離機、c. 斜篩式固液分離機)。

Fig. 2. Sampling points of cow manure solids with different separation types. (a. Mechanical scraper, b. Waterwheel solid-liquid separator, c. Inclined screen separator).

- (ii) 牛糞固態衍生燃料產製：將上述收集之 3 種牛糞固形物，分批平鋪於塑膠房內水泥地面，以太陽能乾燥後，再利用市售農業用塑膠網，網目分別為 3.8 mm 以下、3.8 – 10、10 – 13、13 – 20、20 – 24 及 24 mm 以上，過篩牛糞固態衍生燃料，其粒徑分布百分比如表 1 所示。ISS 之牛糞固態衍生燃料粒徑較小，粒徑低於 3.8 mm 以下者占 56.1%，在考慮進行燃燒試驗可能有其困難性，故利用造粒機 (DFAA-15, WONDERFUL Machine Industrial Co., Taiwan) 進行造粒，產製直徑為 6 mm，長為 16 – 19 mm 之牛糞固態衍生燃料。固態衍生燃料產製為將廢棄物經破碎、分選、乾燥、混合添加劑及成型等處理過程，但本試驗之 MS 及 WSS 分離後之牛糞固形物直接曬乾後已成塊狀，則可免去產製等處理過程。

III. 牛糞固形物、固態衍生燃料特性及燃燒氣體分析

- (i) 水分 (moisture) 及凱氏氮 (Kjeldahl nitrogen, KN) 含量：依環境部公告之檢測方法 (NIEA R203.02C) 測定水分後；以 NIEA R410.21C 方法分析凱氏氮含量。
- (ii) 有機質 (organic matter, OM) 含量估算：灰分含量測定後，依照 Nolan *et al.* (2011) 方法，有機質 (%) = (1 – 灰分含量) × 100 估算之。
- (iii) 灰分 (ash)、銅 (Cu) 及鋅 (Zn) 含量分析：樣品經水分測定精秤後，放入灰化爐 (MF-40L, Channel, Taiwan)，在 550 – 650°C 溫度下灰化約 6 小時。樣品灰化、冷卻、精秤，記錄灰分含量後，加入 3 N 的鹽酸 10 mL，以錶玻璃覆蓋置 350°C 電熱板進行酸解。酸解後以 1 號濾紙過濾並定量，以原子吸收光譜儀 (Spectrophotometer Z8100, Hitachi, Japan) 測定銅及鋅含量。
- (iv) 固態衍生燃料熱值 (calorific value) 分析：使用燃燒彈熱卡計法 (NIEA R214.01C) 以定容程序測試出 3 種固態衍生燃料之燃燒熱值。
- (v) 固態衍生物燒產生的空氣污染物，以環境部公告方法進行採樣。粒狀污染物 (particulate pollutant) 以排放管

道中粒狀污染物採樣及其濃度之測定方法 (NIEA A101.77C)，二氧化硫 (sulfur oxides, SOX expressed as SO₂) 以排放管道中二氧化硫自動檢測方法－非分散性紅外光法、紫外光法、螢光法 (NIEA A413.76C)，氮氧化物 (nitrogen oxides, NO_x expressed as NO₂) 採用排放管道中氮氧化物自動檢測方法－氣體分析儀法 (NIEA A411.75C)。

表 1. 不同分離型態之牛糞固態衍生燃料粒徑分布

Table 1. Particle size distribution of solid-derived fuel from cow dung with different separation types

Mesh (mm)	Mechanical scraper		Waterwheel solid-liquid separator		Inclined screen separator	
	Percentage	Cumulative percentage	Percentage	Cumulative percentage (%)	Percentage	Cumulative percentage
Above 24	19.2	19.2	10.5	10.5	0.0	0.0
20 – 24	10.5	29.7	8.2	18.7	0.0	0.0
13 – 20	25.7	55.4	13.4	32.1	7.1	7.1
10 – 13	20.4	75.8	13.0	45.1	6.6	13.7
3.8 – 10	18.5	94.3	26.7	71.8	30.2	43.9
Below 3.8	5.7	100.0	28.2	100.0	56.1	100.0

IV. 燃燒氣體排放量計算

依行政院環境保護署 (2013) 「公私場所固定污染源空氣污染物排放量申報管理辦法」之計算公式，簡示如下：

(i) 粒狀污染物

$$\text{排放量 (kg/h)} = \text{實測濃度 (mg/Nm}^3\text{)} \times \text{乾基排氣量 (Nm}^3\text{/min)} \times 60 \text{ min/h} \times 10^{-6} \text{ (kg/mg)} \text{ — 公式 1}$$

(ii) 二氧化硫及氮氧化物

$$\text{排放量 (kg/h)} = \text{實測濃度 (ppm)} \times \text{分子量} \div 22.4 \times \text{乾基排氣量 (Nm}^3\text{/min)} \times 60 \text{ min/h} \times 10^{-6} \text{ (kg/mg)} \text{ — 公式 2}$$

V. 統計分析

不同固液分離型態之固形物成分分析資料，利用 SAS 套裝軟體 (SAS, 2012)，進行統計分析，以一般線性模式程序 (general Linear Model Procedure, GLM) 進行變方分析，並以鄧肯氏新多次變域測定法 (Duncan's New Multiple Range Test) 比較不同分離型態之差異顯著性。

結果與討論

I. 牛糞固形物分離型態之固形物組成成分

本研究分別於牛床機械刮糞 (MS)、水車式分離後再經擠壓後 (WSS) 與斜篩式分離再經擠壓 (ISS) 進行固形物採集 (圖 2) 並分析，括水分、灰分、有機質、總氮、銅及鋅等項目，結果如表 2 所示。其中水分、灰分、總氮及鋅等濃度以 MS's 顯著高於 WSS's 與 ISS's ($P < 0.05$)，MS's、WSS's 與 ISS's 之水分及灰分則分別為 86.5、83.8 與 83.2 及 16.2%、6.12 與 5.32%。MS's、WSS's 與 ISS's 之總氮、鋅平均值分別為 2.39 和 1.64 與 1.50%、86.8 和 53.5 與 44.3 ppm。牛糞固形物有機質以 MS's 顯著低於 WSS's 與 ISS's 之分析值 ($P < 0.05$)，平均值分別為 83.8 和 93.9 與 94.7%；銅含量平均值分別為 19.6 和 14.2 及 13.2 ppm，無顯著差異。本研究之 MS's、WSS's 與 ISS's 含水率為 83.2 至 86.5%，固形物含水率與行政院農業委員會畜產試驗所 (2010) 調查指出泌乳牛及乾乳牛糞便含水率分別為 85.3 及 83.6% 相近，銅及鋅濃度分別為 46 及 252 ppm。Shen *et al.* (2015) 研究牛糞中銅及鋅的濃度分別為 56.2 至 66.4 ppm 及 133 至 157 ppm，前述兩份研究結果，均高於本研究。探究可能原因為本試驗之牛糞固形物有經尿液 (MS) 或沖洗水稀釋 (WSS 及 ISS) 之故。

II. 固態衍生燃料特性分析

(i) 物性與熱值分析

將 MS's、WSS's 與 ISS's 之牛糞固態衍生燃料，進行水分、灰分、元素及熱值分析，並計算可燃物百分比，結果如表 3。MS's、WSS's 與 ISS's 之固態衍生燃料之水分、灰分及可燃物平均值分別為 14.2、17.1 及 68.7% 和 16.0、15.5 及 68.5 與 13.0、10.4 及 76.6%。ISS's 的可燃物平均含量較高於 MS's 和 WSS's。MS's、WSS's 與

ISS's 之熱值分別 4,042 (16.92)、3,974 (16.64) 及 4,195 (17.56) kcal (MJ) /kg。固態衍生燃料主要含有碳 (C)、氫 (H) 和氧 (O)，本研究分析 3 種來源之牛糞固態衍生燃料之 C (35.1 – 42.7%)、H (5.39 – 6.08%) 和 S (0.23 – 0.51%) 數值，相似其他各國文獻 (Wang *et al.*, 2020; Maj *et al.*, 2021; Szymajda *et al.*, 2021; Maj *et al.*, 2022; Gadhi *et al.*, 2024)。ISS's 的 C 含量亦高於 MS's 和 WSS's。碳含量的重要性在於其對生物質熱值的正面影響，對於燃燒而言，其透過放熱反應氧化成 CO₂，熱值和碳含量是重要的品質特性，當牛糞作為發電廠和熱電聯工廠的替代能源時 (Szymajda *et al.*, 2021)。參考不同回顧文獻之牛糞熱值，如 Font-Palma (2019) 指出，其不同品種與來源之牛糞的高熱值 (higher heating value, HHV) 從 8.7 – 18.7 MJ/kg；Maj *et al.* (2022) 亦彙整不同品種與來源之牛糞的高熱值範圍在 13.41 – 19.04 MJ/kg。Szymajda *et al.* (2021) 將牛糞製成顆粒狀燃料的低熱值 (lower heating value, LHV) 為 16.34 MJ/kg，與本試驗 3 組固態衍生燃料之熱值 (16.34 – 17.56 MJ/kg) 接近，而其報告整理之表格中，其他品種之牛糞之高熱值範圍 (11.95 – 17.61 MJ/kg) 與低熱值 (11.08 – 16.34 MJ/kg)。Huang *et al.* (2019) 之研究，稻稈及木屑之高熱值分別為 14.3 及 17.9 MJ/kg，而本研究 3 組固態衍生燃料之熱值 (約 4,000 kcal/kg) 相當，顯示牛糞產製固態衍生燃料之熱值，具替代燃料利用之可行性。亦有研究以牛糞混合紡織污泥 (75 : 25, w : w%) 造粒後進行燃燒試驗，以提升廢棄物持續增值為能源來源之新技術 (Gadhi *et al.*, 2024)；而 Anwar *et al.* (2024) 則是在牛糞中添加不同比例之其他農業植物質 (agricultural phytomass)，例如：鋸木屑、甘蔗渣、麥悍、油菜殼和稻殼等，均具高總熱值 (gross calorific value, GCV)，將純牛糞 GCV (3,066 kcal/kg) 提升到 3,600 kcal/kg，混合燃料之揮發物成分 (volatile matter content) 也從 60 提升到 68%，灰分從 19 減少為 11%。

表 2. 不同分離型態之牛糞固形物組成

Table 2. Composition of cow dung solids with different separation types

Treatment	Moisture	Ash	OM*	KN [#]	Cu [#]	Zn [#]
	%	%	%	%	ppm	ppm
Mechanical scraper	86.5 ^a	16.2 ^a	83.8 ^b	2.39 ^a	19.6 ^a	86.8 ^a
Waterwheel solid-liquid separator	83.8 ^b	6.12 ^b	93.9 ^a	1.64 ^b	14.2 ^a	53.5 ^b
Inclined screen separator	83.2 ^b	5.32 ^b	94.7 ^a	1.50 ^b	13.2 ^a	44.3 ^b

KN: Kjeldahl nitrogen.

* Calculated by OM (organic matter) = (100% – ash) (Nolan *et al.*, 2011).

[#] Dry basis.

^{a, b} Means in the same column with the different superscript differ significantly (P < 0.05).

(ii) 空氣污染物分析

本研究產製之牛糞固態衍生燃料，利用燃燒爐 (圖 1) 進行燃燒，分析其排氣管道中的二氧化硫 (SO₂)、氮氧化物 (NO_x) 及粒狀污染物 (particulate pollutant) 排放濃度。MS's、WSS's 與 ISS's 等牛糞固態衍生燃料，其排氣管道中 SO₂、NO_x 及粒狀污染物實測值，經 6% O₂ 校正濃度值，分別為 204、701 及 2,590 mg/Nm³、283、639 及 1,564 mg/Nm³ 與 230、617 及 3,873 mg/Nm³ (表 4)，其中 SO₂ 排放濃度與 Szymajda *et al.* (2021) 之研究接近 (244.38 mg/Nm³)，在 NO_x (255.92 mg/Nm³) 則高出許多，可能原因為乳牛日糧中之粗蛋白質添加偏高，會造成糞便中含蛋白質 (氮源) 亦偏高，本試驗顯示 3 種固態衍生燃料之氮 (1.37 – 2.37%) 偏高 (表 3)，於燃燒時產生較高 NO_x；而木質顆粒燃料 (woody pellets) 兩者均非常低。本研究之粒狀污染物、SO₂ 及 NO_x 濃度校正值，除 SO₂ 符合環境部 (2023) 公告固定污染源空氣污染物排放標準 (300 ppm or 785 mg/Nm³) 外，NO_x 及粒狀污染物均高於 (500 ppm or 614 mg/Nm³) 及 50 mg/Nm³ 排放標準。本試驗結果顯示，直接燃燒牛糞固態衍生燃料，恐會污染環境，故需加裝空氣污染防治設備。Park *et al.* (2013) 及 Begum *et al.* (2009) 之研究指出牛糞燃燒及孟加拉生質燃料 (木頭、牛糞及農業廢棄物) 使用於廚房，燃燒過程會產生粒狀物、揮發性有機污染物 (VOCs) 及有機碳等。本試驗 3 種不同衍生燃料燃燒之 SO₂ 與 NO_x 排放量分別介於 0.022 – 0.028 kg/h 及 0.097 – 0.12 kg/h，變化不大。粒狀污染物以 ISS's 0.44 kg/h 最高，WSS's 0.17 kg/h 最低。Dolzynska *et al.* (2020) 指出，NO_x 排放量除了會隨著燃料中氮含量的增加而提高，空氣供應、爐體形狀、燃燒溫度和所使用的燃燒技術類型亦會影響 NO_x 形成。可藉由調整衍生燃料顆粒大小、添加輔助成分、改善燃燒效率或改進燃燒方式來控制 NO_x 形成。Qian *et al.* (2019) 提出雞糞墊料與天然氣混燒，增加家禽墊料含量混合比例至 4.51 可潛在地減少 SO₂ 和 NO_x 的排放，家禽糞便和天然氣的共燃有可能成為將傳統燃料轉化為電能的更清潔的替代品，同時減少排放。以牛糞與木質生物質混合為製成燃料，將使整體燃料更具經濟性 (Roy *et al.*, 2010; Anwar *et al.*, 2024)。

表 3. 不同分離型態之牛糞固態衍生燃料之成分分析與熱值
 Table 3. Characteristics and calorific value of solid-derived fuels of cow manure with different separation types

Treatment	Moisture	Ash [#]	Combustibles [*]	C [#]	H [#]	O [#]	N [#]	S [#]	Caloric value
Mechanical scraper	14.2	17.1	68.7	39.3	5.5	31.9	2.2	0.5	4,042
Waterwheel solid-liquid separator	16.0	15.5	68.5	35.1	5.4	36.0	2.4	0.4	3,974
Inclined screen separator	13.0	10.4	76.6	42.7	6.1	30.8	1.4	0.2	4,195

[#] Dry basis.

^{*} Calculated by combustibles = (100% – moisture – ash), include volatile matter and fixed carbon.

表 4. 牛糞固態衍生燃料燃燒之排氣成分

Table 4. Exhausted gas components of cow dung solid-derived fuels after combustion

Treatment	Exhaust volume [#] (Nm ³ /min)	SO ₂			NO ₂			Particulate pollutant		
		Actual measured value	Corrected value	Pollutants emission	Actual measured value	Corrected value	Pollutants emission	Actual measured value	Corrected value	Pollutants emission
		(mg/Nm ³)	(mg/Nm ³)	(kg/h)	(mg/Nm ³)	(mg/Nm ³)	(kg/h)	(mg/Nm ³)	(mg/Nm ³)	(kg/h)
Mechanical scraper	6.96	49.0	204	0.022	168	701	0.12	622	2,590	0.28
Waterwheel solid-liquid separator	6.13	69.9	283	0.028	158	639	0.097	428	1,564	0.17
Inclined screen separator	6.88	58.6	230	0.026	156	617	0.11	981	3,873	0.44

[#] Dry basis.

SO₂: Sulfur dioxide.

NO₂: Nitrogen dioxide.

結 論

MS、WSS 分離後及 ISS 分離後之固形物產製之牛糞固態衍生燃料，粒徑大於 3.8 mm 以上者，分別為 94.3、71.8、43.9%，顯示 MS's 與 WSS's 產製之固態衍生燃料可逕行燃燒。而牛糞產製 3 種固態衍生燃料之熱值介於 3,974 至 4,195 kcal/kg，相當於廢稻桿之熱值，可達到一般生質燃料之熱值，具替代燃料利用之可行性。本研究產製之牛糞固態衍生燃料，經燃燒試驗分析排氣管道中的 SO₂、NO₂ 及粒狀污染物排放濃度，除 SO₂ 符合環境部公告固定污染源空氣污染物排放標準外，NO₂ 及粒狀污染物均高於排放標準。未來可藉由調整衍生燃料顆粒大小、添加輔助成分、改進爐體形狀、燃燒溫度和燃燒技術類型等降低污染物濃度。

參考文獻

- 行政院農業委員會畜產試驗所。2010。畜禽糞尿量及其成分。行政院農業委員會畜產試驗所專輯第 141 號。
- 行政院環境保護署。2013。公私場所固定污染源空氣污染物排放量計算方法規定。中華民國 112 年 3 月 29 日行政院環境保護署環署空字第 1020024943 號公告修正。
- 環境部國家環境研究院。2004。廢棄物熱值檢測方法－燃燒彈熱卡計法 (NIEA R214.01C)。中華民國 93 年 11 月 19 日環署檢字第 0930084869 號公告。
- 環境部國家環境研究院。2004。廢棄物中凱氏氮含量檢測方法 (NIEA R410.21C)。中華民國 93 年 12 月 22 日環署檢字第 0930094520 號公告。
- 環境部國家環境研究院。2009。事業廢棄物水分測定方法－間接測定法 (NIEA R203.02C)。中華民國 98 年 5 月 11 日環署檢字第 0980040837A 號公告。
- 環境部國家環境研究院。2016。排放管道中氮氧化物自動檢測方法－氣體分析儀法 (NIEA A411.75C)。中華民國 105 年 1 月 4 日環署檢字第 1040109638 號公告。
- 環境部國家環境研究院。2021。排放管道中粒狀污染物採樣及其濃度之測定方法 (NIEA A101.77C)。中華民國 110 年 12 月 3 日環署授檢字第 1101006430 號公告。
- 環境部國家環境研究院。2023。排放管道中二氧化硫自動檢測方法－非分散性紅外光法、紫外光法、螢光法 (NIEA A413.76C)。中華民國 112 年 12 月 18 日環部授研字第 1125105687 號。
- 環境部。2023。固定污染源空氣污染物排放標準。中華民國 112 年 6 月 14 日行政院環境保護署環署空字第 1121064054D 號令修正。
- 吳佩芬、葛家賢。2001。固態廢棄物衍生燃料技術簡介。財團法人臺灣產業服務基金會。
- 鄭閔謙、蘇天明、蕭庭訓、蕭宗法、劉主欣、程梅萍。2014。牛糞固形物產製活性碳之評估。畜產研究 47：205-212。
- Anwar, M. T., N. Ullah, S. Khalid, N. Ahmad, and M. Shahzeb Khan. 2024. Fuel composites development using cow dung and agricultural biomass. *Mater. Proc.* 17(1): 23.
- Begum, B. A., S. K. Paul, M. D. Hossain, S. K. Biswas, and P. K. Hopke. 2009. Indoor air pollution from particulate matter emissions in different households in rural areas of Bangladesh. *Build. Environ.* 44: 898-903.
- Bhargava, A., R. N. Khanna, S. K. Bhargava, and S. Kumar. 2004. Exposure risk to carcinogenic PAHs in indoor-air during biomass combustion whilst cooking in rural India. *Atmos. Environ.* 38: 4761-4767.
- Burton, C. H. 2007. The potential contribution of separation technologies to the management of livestock manure. *Livest. Sci.* 112(3): 208-216.
- Cao, H., Y. Xin, D. Wang, and Q. Yuan. 2014. Pyrolysis characteristics of cattle manures using a discrete distributed activation energy model. *Bioresour. Technol.* 172: 219-225.
- Dolzynska, M., S. Obidzinski, J. Piekut, and G. Yildiz. 2020. The utilization of plum stones for pellet production and investigation of post-combustion flue gas emissions. *Energies* 13(19): 5107.
- Font-Palma, C. 2019. Methods for the treatment of cattle manure - a review. *J. Carbon Res.* 5(2): 27.
- Gadhi, T. A., R. B. Mahar, T. A. Qureshi, M. R. Bawani, D. A. Khokhar, M. A. Pinjaro, I. Ansari, and B. Bonelli. 2024. Valorization of textile sludge and cattle manure wastes into fuel pellets and the assessment of their combustion characteristics. *ACS Omega* 9(1): 456-463.
- Hjorth, M., K. V. Christensen, M. L. Christensen, and S. G. Sommer. 2010. Solid liquid separation of animal slurry in theory

- and practice. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30: 153-180.
- Huang, H. J., Y. C. Chang, F. Y. Lai, C. F. Zhou, Z. Q. Pan, X. F. Xiao, J. X. Wang, and C. H. Zhou. 2019. Co-liquefaction of sewage sludge and rice straw/wood sawdust: The effect of process parameters on the yields/properties of bio-oil and biochar products. *Energy* 173: 140-150.
- Maj, I. 2022. Significance and challenges of poultry litter and cattle manure as sustainable fuels: a review. *Energies* 15(23): 8981.
- Maj, I., S. Kalisz, A. Szymajda, G. Łaska, and K. Gołombek. 2021. The influence of cow dung and mixed straw ashes on steel corrosion. *Renew. Energy* 177: 1198-1211.
- Maj, I., S. Kalisz, and S. Ciukaj. 2022. Properties of animal-origin ash—a valuable material for circular economy. *Energies* 15(4): 1274.
- Nolan, T., S. M. Troy, M. G. Healy, W. Kwapinski, J. J. Leahy, and P. G. Lawlor. 2011. Characterization of separated pig manure composted with a variety of bulking agents at low initial C/N ratios. *Bioresour. Technol.* 102: 7131-7138.
- Park, D., M. L. Barabad, G. Lee, S. B. Kwon, Y. Cho, D. Lee, K. Cho, and K. Lee. 2013. Emission characteristics of particulate matter and volatile organic compounds in cow dung combustion. *Environ. Sci. Technol.* 47: 12952-12957.
- Qian, X., S. Lee, R. Chandrasekaran, Y. Yang, M. Caballes, O. Alamu, and G. Chen. 2019. Electricity evaluation and emission characteristics of poultry litter co-combustion process. *Appl. Sci.* 9: 4116.
- Rico, J. L., H. García, C. Rico, and I. Tejero. 2007. Characterisation of solid and liquid fractions of dairy manure with regard to their component distribution and methane production. *Bioresour. Technol.* 98: 971-979.
- Roy, P. C., A. Datta, and N. Chakraborty. 2010. Assessment of cow dung as a supplementary fuel in a downdraft biomass gasifier. *Renew. Eng.* 35(2): 379-386.
- SAS. 2012. SAS/STAT User's Guide, Version 9.4. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Shen, X., G. Huang, Z. Yang, and L. Han. 2015. Compositional characteristics and energy potential of Chinese animal manure by type and as a whole. *Appl. Energy* 160: 108-119.
- Szymajda, A., G. Łaska, and M. Joka. 2021. Assessment of cow dung pellets as a renewable solid fuel in direct combustion technologies. *Energies* 14(4): 1192.
- Tsai, W. T. and S. C. Liu. 2015. Thermochemical characterization of cattle manure relevant to its energy conversion and environmental implications. *Biomass Conv. Bioref.* 6: 71-77.
- Wang, J., M. Ma, Y. Bai, W. Su, X. Song, and G. Yu. 2020. Effect of CaO additive on co-pyrolysis behavior of bituminous coal and cow dung. *Fuel* 265: 116911.
- Yuan, X., T. He, H. Cao, and Q. Yuan. 2017. Cattle manure pyrolysis process: Kinetic and thermodynamic analysis with isoconversional methods. *Renew. Eng.* 107: 489-496.
- Zhang, J., J. Liu, F. Evrendilek, W. Xie, J. Kuo, X. Zhang, and M. Buyukada. 2019. Kinetics, thermodynamics, gas evolution and empirical optimization of cattle manure combustion in air and oxy-fuel atmospheres. *Appl. Therm. Eng.* 149: 119-131.

Production and combustion evaluation of refuse-derived fuels from cow dung ⁽¹⁾

Hsiu-Wen Ou ⁽²⁾ Ting-Hsun Hsiao ⁽²⁾ Wei-Zhi Liu ⁽²⁾ Tein-Ming Su ⁽²⁾ and Cheng-Hsun Chung ⁽²⁾⁽³⁾

Received: Jun. 25, 2024; Accepted: Apr. 15, 2025

Abstract

In this study, the solids of cow dung (CD) were collected from the mechanical scraper (MS), waterwheel solid-liquid separator (WSS), and inclined screen separator (ISS) of a dairy farm, which produced into CD solid derived fuels using solar drying. The particle size, calorific value, and combustion pollutants (particulate pollutant, sulfur oxides, nitrogen oxides) from the fuels were analyzed for the traits and composition. The results showed that the percentages of particle size over 3.8 mm after the solid-liquid separation were 94.3, 71.8 and 43.9%, respectively, for MS, WSS and ISS of cow dung derived fuels. The calorific values of the fuels were between 3,974-4,195 kcal/kg, which were feasible for utilization as the alternative fuel. These 3 solid-derived fuels of CD included C (35.1-42.7%), H (5.39-6.08%), O (30.8-36%), N (1.37-2.37%), and S (0.23-0.51%). After combustion, the corrected concentration ranges of SO₂, NO₂, and particulate pollutants in the exhaust pipe were (204-283 mg/Nm³), (617-701 mg/Nm³), and (1,564-3,873 mg/Nm³), respectively. Only SO₂ complied with the air pollutant emission standards of Taiwan. Therefore, this research suggests that in the future, means by adjusting the size of derived fuel particles, adding auxiliary ingredients, air supply, furnace geometry, combustion temperature, and type of combustion technology could be adopted to improve and reduce the air-pollutant concentration.

Key words: Cow dung, Refuse-derived fuels, Solid-liquid separation, Calorific value.

(1) Contribution No. 2820 from Taiwan Livestock Research Institute (TLRI), Ministry of Agriculture (MOA).

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

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