

廢棄物類

食品廢棄物應用黑水虻處理的效益評估

段紀義*、梁世祥**、周瑞興***

摘 要

含有大量有機物質的食品廢棄物，可視為另一種剩餘資源，值得回收再利用，所以如何有效處理食品廠最後產出的廢棄物，實有進一步研究的必要。

現行食品廢棄物處理方式依序可分為脫水、烘乾、堆肥、資源再利用等程序，處理上多工又耗時，本研究應用黑水虻生物處理方法，處理食品廢棄物，並進行效益評估及整合探討。在生產動物膠過程中，由動物皮層萃取動物膠後，最後仍有動物渣等廢棄物留存，研究以黑水虻進行餵養實驗；黑水虻養殖共可分為 4 大階段，分別為卵孵化期、幼蟲成長期、成蛹期、及成蟲期，其中只有幼蟲期需進行餵食。

結果顯示豬皮渣經黑水虻幼蟲進食處理過後，排出蟲糞的殘餘物重量減少約 55%，含水率可由 70% 降低至約 20%，處理過的蟲糞亦可直接作為土壤改良資材利用。應用黑水虻生物處理食品廢棄物，應可取代傳統烘乾及堆肥 2 個處理程序。

整體養殖過程，明顯並無惡臭產生、且可改善廢棄物衍生蚊蟲等環境衛生等問題，在廢棄物存放、清運及處理上均有效改善。對於食品產業而言，黑水虻處理方案或可取代傳統廢棄物烘乾、焚化方式，除可減少燃料油及電力使用，亦可降低 CO₂ 排放，相對於對整個動物膠生產程序，亦可符合綠色工廠要求。

【關鍵字】食品廢棄物、動物渣、黑水虻

* 新加坡商傑樂生技股份有限公司台灣分公司

經理

** 行政院農業委員會畜產試驗所產業組

助理研究員

*** 新加坡商傑樂生技股份有限公司台灣分公司

副組長

一、前言

食品廢棄物是食品生產及食用過程中最終產出的固體物，含有粗蛋白、粗脂肪等有機物質、灰分等成分。在空氣中暴露，儲存及清運時容易因有機物質腐敗，進而產生臭味，並會招來蚊蟲蒼蠅、致病菌和寄生蟲等環境衛生問題，而使用藥劑除臭及滅蟲也會造成二次污染。近幾年國內經濟成長，食品運用量及種類均大幅增多，相對造成浪費也多，因此食品廢棄物處理量亦大為增加。

食品廢棄物處理的目的為減量化、穩定化、無害化及資源化，一般從食品工廠產出的廢棄物經機械脫水、烘乾減積，最後再經堆肥即可資源再利用。近幾年產業大力提倡綠色生產製程、循環經濟等議題，因此各種解決食品廢棄物的方法，不斷被整合及發展起來，像是利用蚯蚓、昆蟲 (Rehman et al., 2017) 與藻類分解，或做為固態衍生性燃料再利用。黑水虻應用在廚餘上，已有非常多的成功案例 (Nguyen et al. 2015; Lalander et al., 2015)，可大量減少廢棄物處理問題。所以食品廢棄物運用黑水虻處理法除可有效降低含水率達到減積目的，更可進一步將食品廢棄物轉化為肥料，可完全取代烘乾及堆肥過程。

本研究針對的食品廠為使用豬皮做為生產原料產製動物膠的生產工廠，最終產物為豬皮渣廢棄物。選取黑水虻二齡幼蟲進行餵養，研究探討動物皮渣經黑水虻幼蟲處理後的去化能力。並與傳統加熱蒸發降低含水率的方式進行比較，評估兩者的操作效益及對環境的影響。主要研究目的在提供食品業者處理廢棄物及資源化處置的較佳處理方案；以往產業界受限專業及環境等問題，在食品廢棄物進行跨領域整合使效益最大化是本研究的重點。

二、文獻回顧

2.1 工業食品廢棄物處理方式

傳統食品廠最終產出的廢棄物，因量過多且含水率過高無法直接進行堆肥再利用。一般會先進行減積處理，將廢棄物內的無用水分去除，如此才不會引起因廢棄物中有機質變異，產生惡臭等環境衛生問題，對於後續儲存、運輸亦可有效執行，並可減少不必要的操作成本及浪費；但對於堆肥再利用過程產生的味道問題，仍無明顯改善效果。常見的脫水設備有帶式壓濾脫水機、板框式壓濾脫水機及離心式脫水機等，脫水後廢棄物的含水率為 60-80% (張添晉等, 2008)；後再經烘乾設備將水分蒸發減積，使含水率降低到約 40% 以下，最後再經由堆肥處理後即可進行資源再利用 (李中光等, 2013)。

由於目前環保問題愈來愈嚴重，傳統上處理到最終成肥料再利用過程所需時間較長，而且處理過程中容易產生惡臭及環境衛生等問題，特別是堆肥過程問題更加嚴重。另外脫水及烘乾過程亦會耗用大量燃油及電力能源，整個處理過程中對於 CO₂ (能源局, 2011) 排放等造成環境暖化的衍生後續污染問題亦是須面對改善的議題之一。

2.2 黑水虻

黑水虻，英文名稱 **Black soldier fly**，亦稱為光亮扁角水虻蟲，是雙翅目水虻科扁角水虻屬的昆蟲，養殖過程只有在幼蟲時期有攝食行為，幼蟲取食範圍非常廣泛，對於廚餘垃圾、腐爛植物、動物屍體及糞便等，均可作為食物來源 (朱芬, 2019)。

黑水虻經由自身的取食機制和消化作用，可以將食物中的有機廢棄物轉化為生長所需的蟲體蛋白，而食物廢棄物經黑水虻消化後的排泄出的虻糞可直接作為生物肥料 (Webster et al., 2016; 梁世祥等, 2019)，也是相當良好的土壤改良資材 (Kumar et al., 2018)。而黑水虻長大的幼蟲，亦可作為雞隻及水產養殖飼料用 (Kumar et al., 2018; 劉興等, 2017)。

整體消化過程為在蟲體內進行厭氧消化，並無臭味產出，因此可有效改善環境衛生等問題 (李峰等, 2016)，並可達到循環經濟地目的 (陳靜瑩, 2021)。楊森 (2010) 研究顯示利用黑水虻處理豬糞，乾的豬糞物質減少了 41~51%，並獲得原乾豬糞重量 10.6~15.1% 的的黑水虻體乾重。Bosch et al. (2019) 的報告中也提到，豬糞、雞糞、牛糞、豆腐渣等廢棄物經由黑水虻處理後，可將廢棄物中的氮轉化成為蟲體蛋白。

黑水虻的許多生物學特性都適合用於禽畜糞便的轉化，例如幼蟲喜食腐食性物品、食物種類性雜、進食量大、生長環境抗逆性強、生活史重疊且彈性很大、預蛹營養價值高、在化蛹前有遷移特性等；因此在研究禽畜糞便轉化為昆蟲蛋白的領域，從眾多雙翅目昆蟲中，很快就發現黑水虻的優異表現，及受到廣泛關注。(Sheppard et al., 1994; Jozefiak et al., 2010)。

早期的研究聚焦於黑水虻的生物學特性和對環境安全性的評估，研究結果發現黑水虻對人類完全無害，對環境亦非常安全；黑水虻成蟲不會攜帶病菌，也不會侵入人類生活的居住環境，對農作物也只取食少量的植物汁液，不會形成任何危害 (安新城等, 2010)。

黑水虻生命週期一般在 30~40 天，如圖 1 中可以區分為卵、幼蟲、蛹和成蟲 4 個階段；朱芬 (2019) 對於黑水虻各階段的相關養殖方法已有詳細說明。



圖 1 黑水虻各時期生活史

實際上，最早開始注意到黑水蛇的研究，是因為其能夠有效地控制野生的家蠅種群，研究中觀察發現家蠅的數量在黑水蛇繁衍棲息糞堆的附近很少，而且家蠅成蟲也會盡量避免在黑水蛇幼蟲取食的糞堆上產卵；研究實驗顯示，在混合飼養黑水蛇和家蠅幼蟲的情況下，只有少量家蠅的幼蟲能夠發育到成蟲階段，黑水蛇幼蟲能夠經由幼蟲生存競爭環境來抑制家蠅種群 (Sheppard, 1983; Furman et al., 1959)。後續的一些黑水蛇研究中，幼蟲在取食過程中可有效消化和分解糞便中的有害病菌，因此對環境的危害性亦可降低 (陸麗珠等，2020)。

三、材料與方法

3.1 研究材料

1. 烘乾設備

研究內食品廠使用的烘乾設備為容積 2,000 L 的臥式橫軸攪拌機，如圖 2 所示，此設備為外層夾套式乾燥設備，夾層內供應高溫蒸氣。內層在充分攪拌下，利用蒸氣冷凝放熱將豬皮渣中水分蒸發，以達到降低豬皮渣含水率的目的。豬皮渣廢棄物每次烘乾投料約 1,000 kg 及含水率約 70%，在充分攪拌烘乾下，鍋內溫度可維持在 60°C，經過 10 小時烘乾後，可將豬皮渣廢棄物含水率烘乾降低到約 20%。

表 1 為攪拌烘乾設備操作參數，烘乾後水量蒸發為 625 kg，蒸發熱量需求為 352,312 kcal ($=625 \times 563.7$ kcal/kg @60°C 的汽化潛熱)，依表 1 技術參數得到約需要燃料油 36.7 L ($=352,312/9,600$ kcal/L @ 每公升燃料油熱值 (Smith et al., 1987)，及電力耗用 108kW ($=12 \times (7.5+1.5)$)。

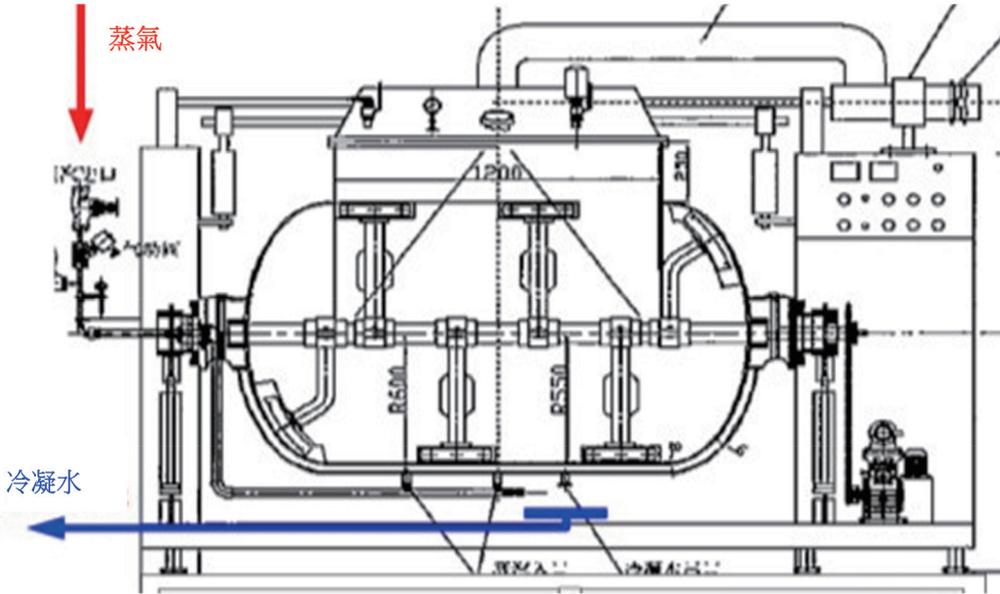


圖 2 卧式橫軸攪拌機設備構造圖

表 1 卧式橫軸攪拌機技術參數

型號	TLHK-2,000 L 卧式橫軸攪拌機
主缸體	容積：2,000 L
	夾套工作壓力：0.3 MPa
	夾套最高溫度：134°C 加熱面積：3.4 m ²
	缸體直徑：Φ1,100 mm 長方體：1,200×1,100×800 mm 夾套：Φ1,200 mm
	蒸氣入口：DN22 mm 冷凝水出口：DN25 mm
	進料管：DN50 mm 排氣管：Φ133 mm
攪拌機	電機功率：440 V、7.5 kW
	鍋輪減速機：WPS155 型、速比 1:50
	變頻器：440 V、1.5 kW
外型尺寸	3,100×1,500×2,250 mm(不含開蓋尺寸)
設備重量	2,540 kg

2. 豬皮渣

研究內使用的食品廢棄物為豬皮渣，取自國內動物膠生產工廠，新鮮豬皮經過 50~60°C 熱水萃取生產動物膠後，最後產出剩餘物質即為豬皮渣 (鄭文勝，2006)。此最後殘存的豬皮渣廢棄物中仍含有大量水分，含水率 95% 以上，含水率過高無法直接進行儲存、運輸處理，所以也無法直接堆肥再利用。基本上生產工廠會先經機械脫水處理將豬皮渣的含水率降至 60~80% 以方便後續處理及應用 (段紀義等，2014)。案例中食品工廠使用轉速 3,000 rpm 的固液分離高速離心機，利用高轉速的離心力使固液分離以達到脫水目的，此高速離心機可將豬皮渣含水率降至約 70%。

然後再經過烘乾設備將豬皮渣內水分進一步蒸發使含水率降低至 40~60%，最後再送至廠外進行堆肥處理及回收再利用。研究內使用的豬皮渣，為取自機械烘乾後含水率降至約 30% 的豬皮渣，餵食前再加水增濕到含水率約 70%，並充分拌合成軟泥狀以利幼蟲進食。若後端採用黑水虻轉換，粒徑彈性相對較大，烘乾要求亦較低，含水量以 60~70 % 左右即可。

3. 黑水虻

研究內使用的二齡黑水虻幼蟲為取自法務部矯正署屏東監獄黑水虻廚餘養殖場，該養殖場面積約 10×4.5 公尺，場內使用密林盆 (60L*47W*16H) 養殖，共計養殖 160 個密林盆。監獄內同學每天的廚餘渣產出量約有 600-1,000 kg，均送至黑水虻養殖場內自行去化處理。

養殖場內蟲卵為自行養殖孵化，取 100 g 的蟲卵放入水桶內，再加入約 7 分滿黃豆渣，混合均勻後，取約手掌大小放入養殖密林盆內，於常溫中約 3-5 天可孵化成幼蟲，後續即以餵養廚餘渣為主。飼養盆中幼蟲蠕動會發熱進而影響食慾，所以需要經常翻堆降溫；另依飼養狀況需進行篩分動作，將蟲及排泄物分離開以利餵養工作進行，幼蟲經過 6 個齡期成長後成蛹，蟲蛹需移至網室內等待羽化。

在網室內的蟲蛹羽化成黑水虻成蟲後，並不需要再進行餵食，成蟲會自行交配產卵，羽化後的成蟲約 7 天後會自然死亡，蟲卵取出後可重新孵化成幼蟲再利用。

整體黑水盟蟲養殖由卵孵化、幼蟲養殖、成蟲蛹、最後羽化成蟲至死亡，養殖生命周期約為 1~2 個月的時間，蟲隻可自行繁殖得到，養殖過程中去化廚餘產生的蟲糞等廢棄物亦可做為肥料再利用。

3.2 研究方法

1. 試驗設計

黑水蛇適合生活在溫度 25~35°C、相對濕度 70% 的環境中 (Sheppard et al., 2002)，此生長條件非常適合在國內推廣，特別是在南部高溫潮濕的氣候下，養殖生長環境幾乎不需要的特別準備及維持。

研究內將數量 650g 的二齡幼蟲平均分至 10 個盆餵盆中養殖 (520Lx364Wx178HmmxPP，空盆重 681 g)，每個培養盆內放入 65 g 二齡黑水蛇幼蟲，根據每天秤重後計算餵養盆內水份殘存重量及幼蟲生長情況以判斷需要餵食的時機及量。圖 3 為養殖料架及搭建的網室。

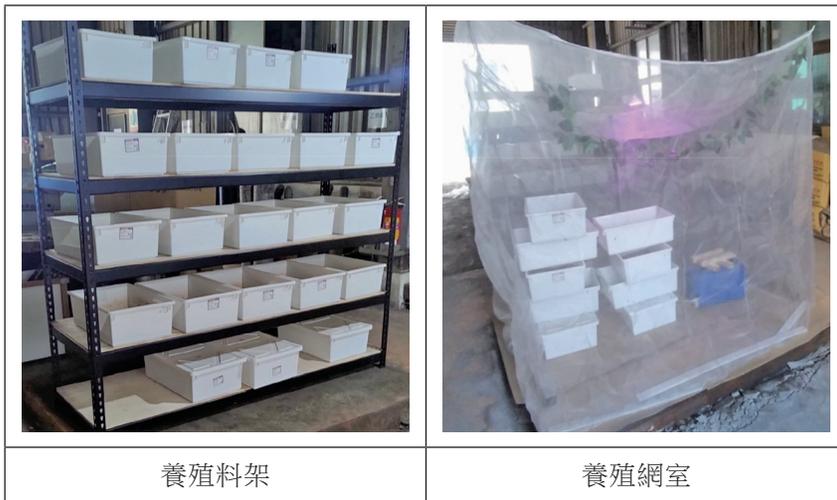


圖 3 養殖設備

動物膠工廠生產最終殘存的豬皮渣廢棄物，經高速離心機脫水後，含水率降至約 70%，在此含水率下可直接將豬皮渣轉作為黑水蛇幼蟲飼料。研究內黑水蛇由二齡蟲開始餵養，至六齡期的預蛹期停止餵食；豬皮渣廢棄物亦先烘乾至含水率約 30% 以便儲存，使用時再加水增濕調配合含水率約 60~70 % 進行餵養。

判斷黑水虻幼蟲養殖到約四齡蟲時期，選取 5 個養殖盆，每個盆內隨機取出最大 100 隻幼蟲分別秤取幼蟲重量，及量取體長，依據幼蟲重量及體長變化，決定幼蟲預蛹的時機，並定出黑水虻幼蟲以豬皮渣餵養最適餵料量。

在篩選餵養黑水虻幼蟲最適餵料量的基礎上，對於黑水虻餵養前的豬皮渣廢棄物及餵養後的殘渣（排出蟲糞）分別秤重及取樣分析含水率，以了解豬皮渣廢棄物經黑水虻轉化後，在重量損失與含水率變化的關係。

研究中針對含水率約 70% 的豬皮渣，分別使用烘乾機乾燥及運用黑水虻幼蟲處理 2 個方案，將豬皮渣內含水率降低到約 20% 後再進行分析比較。

2. 研究試驗流程

圖 4 為本研究的實驗流程。

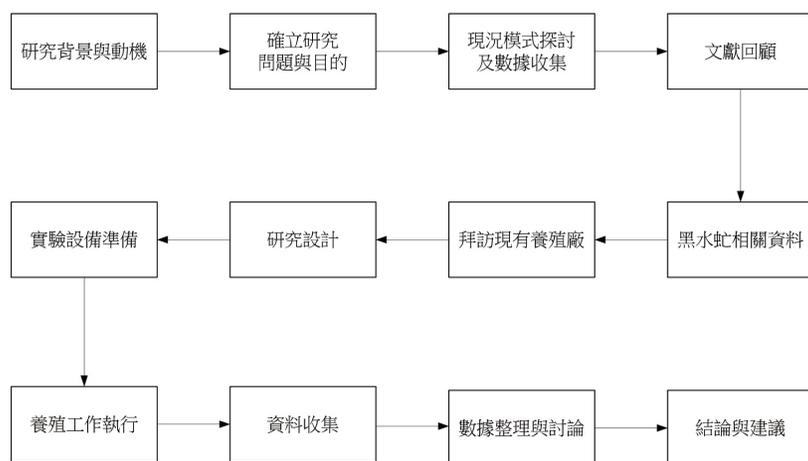


圖 4 研究實驗流程圖

四、黑水虻餵養過程數據整理分析

全部餵養天數為 21 天，表 2 為每天餵養狀況，及加入豬皮渣餵料量的統計數據。表中顯示每盆內放入 65 g 二齡蟲，餵養初期豬皮渣餵料含水率為 55%，觀察幼蟲成長狀況不佳，至第 7 天取樣分析盆內含水率約 35%，因過於乾燥會降低幼蟲食欲，所以每盆再額外加入 500 g 水增加濕度，觀察後續餵養狀況並未明顯改善，所以至第 14

天將豬皮渣餵料直接調升含水率測試，至豬皮渣餵料含水率調升至 73.4% 後，觀察盆內整體含水狀況才明顯改善。

經 21 天餵養後，每盆投入黑水虻二齡蟲及餵養豬皮渣廢棄物後的累計淨重為 7,765g，扣減期初二齡蟲重後的總投入含水豬皮渣廢棄物為 7,700g，其中不含水乾料為 2,707 g，豬皮渣廢棄物平均含水率為 64.84% $(=(7,700-2,707)/7,700)$ 。每盆淨重實秤平均數值為 3,489 g，此數值為實際秤量 10 個餵養盆重量後再扣除空盆重的每盆重量平均值；將每盆淨重累計扣減每盆淨重實秤平均數值後，即為每日養殖盆內豬皮渣廢棄物平均減少量，養殖 21 天後得到損失減少量為 4,276 g，重量減少約 55%。

表 2 養殖盆餵料統計數值 (單位：g)

餵養 天數	初淨重	豬皮渣廢棄物餵料				加入量 累計	淨重 實秤平均值	重量差
		加入量	乾料	水	含水 率 %			
1	65	0	0	0	55.00	65	-	-
2	65	500	225	275	55.00	565	-	-
3	565	300	135	165	55.00	865	603	262
4	865	300	135	165	55.00	1,165	-	-
5	1,165	300	135	165	55.00	1,465	-	-
6	1,465	300	135	165	55.00	1,765	1,286	479
7	1,765	800	135	665	83.13	2,565	-	-
8	2,565	300	135	165	55.00	2,865	1,596	1,269
9	2,865	300	135	165	55.00	3,165	-	-
10	3,165	300	135	165	55.00	3,465	1,789	1,676
11	3,465	300	135	165	55.00	3,765	-	-
12	3,765	300	135	165	55.00	4,065	-	-
13	4,065	300	135	165	58.46	4,365	2,313	2,052
14	4,365	400	166	234	66.77	4,765	2,314	2,451
15	4,765	500	166	334	73.41	5,265	2,849	2,416
16	5,265	500	133	367	73.41	5,765	3,109	2,657
17	5,765	500	133	367	73.41	6,265	3,263	3,002
18	6,265	500	133	367	73.41	6,765	-	-
19	6,765	500	133	367	73.41	7,265	-	-
20	7,265	500	133	367	73.41	7,765	3,929	3,836
21	7,765	0	0	0	-	7,765	3,489	4,276
累計	-	7,700	2,707	4,993	64.84	-	-	-

48 食品廢棄物應用黑水虻處理的效益評估

為確實掌握每盆內幼蟲生長狀況，餵養期間並隨機挑選 5 個餵養盆，於每盆內亦隨機選出較大幼蟲 100 隻，進行 100 隻幼蟲秤重（表 3 為隨機選取 5 個餵養盆，每盆取其中 100 隻最大幼蟲秤重數值）及量測幼蟲體長（表 4 為隨機選取 5 個餵養盆，每盆取 100 隻最大幼蟲量取體長數值），以確實掌握幼蟲生長狀況。

表 3 隨機選取 5 個餵養盆，取 100 隻最大幼蟲秤重數值 (單位：g)

盆數	1	2	3	4	5	平均	
餵養 天數	15	5	6	6	5	6	5.6
	16	5	6	6	5	6	5.6
	17	5	6	7	6	6	6.0
	18	5	5	7	6	7	6.0
	21	5	6	7	7	8	6.6
	23	5	5	5	6	6	5.4
	24	4	5	5	6	6	5.2
	25	5	5	5	5	5	5.0
	28	4	3	4	5	5	4.2

表 4 隨機選取 5 個餵養盆，取 100 隻最大幼蟲量取體長數值 (單位：mm)

盆數	1	2	3	4	5	平均	
餵養 天數	15	13	12	12	13	12	12.3
	16	13	14	13	13	14	13.4
	17	12	13	12	15	14	13.2
	18	13	13	14	14	15	14.0
	21	14	14	15	15	14	14.4
	23	14	14	14	14	15	14.2
	24	13	14	15	14	14	13.9
	25	13	14	14	14	14	13.8
	28	13	14	13	13	12	13.0

圖 5 為 100 隻幼蟲秤重每日數值變化趨勢圖，由圖中可得到黑水虻幼蟲餵養至 21 天的 100 隻幼蟲平均重量增加至 6.6 g 為最大，然後平均重量會下降。圖 6 為 100 隻幼蟲每日體長變化趨勢圖，亦可得到餵養至 21 天的 100 隻幼蟲平均體長達到最大 14.4 mm，隨後也有下降趨勢。

表 5 中為豬皮渣廢棄物養殖黑水虻幼蟲，餵養前後的重量及含水率變化分析數據。表中餵食前豬皮渣廢棄物為 21 日餵食累計總量，餵食期間並未進殘渣篩分等程序，餵食後殘渣為經過 21 日餵食後的全部殘渣量。

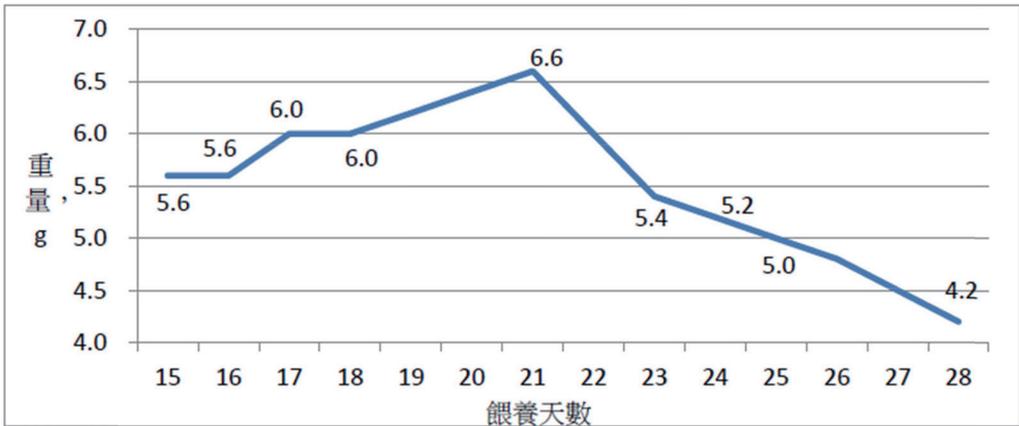


圖 5 100 隻幼蟲秤重每日數值變化趨勢圖

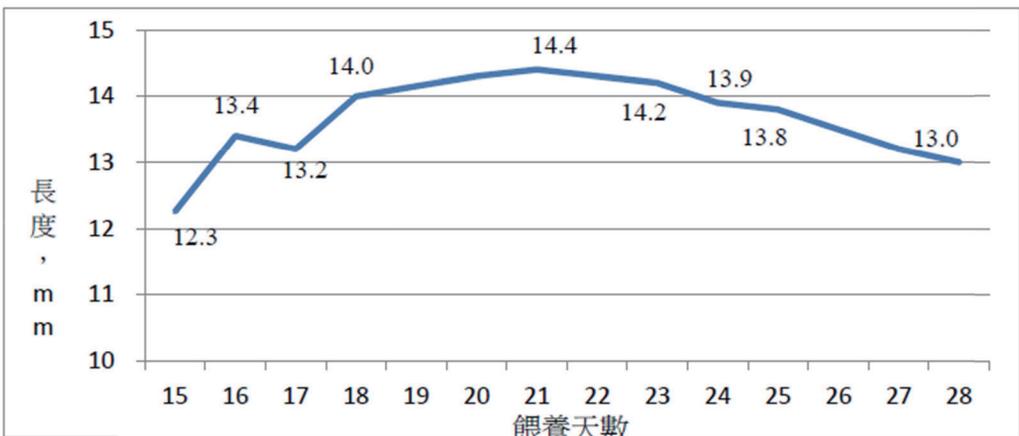


圖 6 100 隻幼蟲量測每日體長變化趨勢圖

表 5 豬皮渣廢棄物養殖黑水虻幼蟲，餵養前後重量及含水率變化分析數值

重量，g	餵食前豬皮渣		餵食後殘渣	
	百分比	重量	百分比	重量
	7,700		3,489	
水份	64.84	4,993	20.39	711
乾料	35.16	2,707	79.61	2,778

五、結果與討論

5.1 豬皮渣作為黑水虻餵料的可行性評估

由表 3 所示，100 隻幼蟲重及表 4 幼蟲體長變化數據中，可以明確看到黑水虻幼蟲長大狀況，所以豬皮渣廢棄物做為黑水虻幼蟲餵料應無問題；測試餵料的含水率以約 70% 的餵養效果較適當，含水率過低會影響幼蟲食欲，含水率過高亦會使餵養盆內環境過於潮濕，造成幼蟲會爬離逃出，主要原因為幼蟲因處相對擁擠空間，過於潮濕時，會有不停爬動企圖離開之行為，而不會安穩待在餵養基質中。圖 7 為幼蟲爬離逃出狀況。



圖 7 餵食料過於潮濕幼蟲爬離逃出狀況

依據黑水虻幼蟲生長狀況，成長到五齡蟲即進入預蛹期，六齡蟲為預蛹期等待成蛹不再進食，但六齡蟲仍會將體內吃進餵食料消化後排出，因此體重會下降，可由此重量變化判斷出幼蟲成長是否達到預蛹期。由表 3、4 中數值及圖 5、6 的趨勢變化，可看到黑水虻幼蟲養殖到 21 天後，100 隻蟲重量到 6.6 g 後開始下降，身體長度到 14.4 mm 亦開始縮小，可據此判斷為五齡蟲要轉為預蛹期，所以餵養至 21 天後即暫停豬皮渣餵料。

與 Holmes et al.(2016) 資料比對，正常黑水虻幼蟲養殖到達預蛹期，100 隻蟲重量約為 19 g，明顯本實驗養殖幼蟲遠小於正常幼蟲的 100 隻蟲重。Gobbi et al.(2013) 提到單獨使用肉粉餵食時，幼蟲生長平均體長 8.06~9.45 mm，遠小於母雞飼料及混料餵食者體長 15.47~16.83 mm，文獻中亦提到只用肉粉飼養時，幼蟲及蛹的死亡率最高。明顯餵食食物的類型及數量對於黑水虻幼蟲成長發育速度有極大的影響，黑水虻幼蟲為雜食性，禽畜糞便、餐廚垃圾、腐爛食物、養殖動物廢棄物等有機廢棄物均可做為餵食料。本實驗使用食品廠之動物渣，主要目的為去化廢棄物，所以並未添加或混拌其它相對營養之材料，由於動物渣營養價值較低，表 6 為豬皮渣主要成分比例，並無碳水化合物，長期餵食造成幼蟲營養不良，進食狀況亦較差，所以幼蟲體重較輕及體長較小，若適當調整混拌餵養基質，應可得品相較好之幼蟲，此結果亦與文獻中結論一致。

表 6 分析豬皮渣內主要成分

	粗脂肪	粗蛋白 *	水份	灰份
成分比例	12.33%	57.49%	34.8529%	0.8369%

* 粗蛋白為分析凱氏氮數值 9.2%，再乘換算係數 6.25 得到

5.2 豬皮渣使用黑水虻去化效能評估

由表 2 所示之餵料統計數據，每個餵養盆中放入 65 g 二齡蟲，餵養 21 天成長至五齡蟲達到預蛹期，期間共餵入含水豬皮渣廢棄物 7,700 g，扣除內部含水後，乾基豬皮渣廢棄物量為 2,702 g；而由 21 天後實際秤取平均每盆淨重量為 3,489 g，兩者間的差異為 4,276 g，重量損失率 55.07% ($=4,276/7,765$)。

因實際秤重時並未進行蟲渣分離，基於質量平衡，所以重量差異應為水分蒸發量。豬皮渣廢棄物經過黑水虻幼蟲處理後，理論加入水量扣除蒸發量後為最後蟲糞中留存水量 717 g ($=4,993-4,276$)，換算含水率為 20.55% ($=717/3,489$)；由表 5 所示之豬皮渣廢棄物養殖黑水虻幼蟲前後重量及含水率比對數值，得到餵養後經幼蟲處理後的蟲糞含水率 20.39%，此分析數據與實際量測數據接近，由此可確認去化率為水份蒸發所致。

豬皮渣廢棄物內水份蒸發的主要原因為幼蟲進食、蠕動及幼蟲排出蟲糞等過程會產生熱量，實際量測餵養盆內溫度可達到 45°C 以上；廢棄物經餵養盆內幼蟲處理後排出的蟲糞因散熱過程使水份蒸發，因此造成最後蟲糞殘渣含水率下降，此水份蒸發過程並不會產生惡臭污染環境，可大為改善豬皮渣廢棄物因烘乾及堆肥過程造成周遭環境不佳及惡臭產出問題。

整體而言，相對豬皮渣廢棄物在經過高速離心脫水後，含水率降至約 70%，此為適當餵料含水率；而運用黑水虻去化動物渣，最後蟲糞含水率同樣可下降至約 20%，此已達到與烘乾設備相同效能。黑水虻養殖系統可重覆再利用，豬皮渣廢棄物為生產工廠最終產出廢棄物，黑水虻可自行養殖育種提供，對於南臺灣養殖環境，養殖過程不須額外提供熱能加熱及電力降溫，所耗費操作成本極低。另對於蟲糞已可直接作為土壤改質劑，與傳統烘乾後尚須經過堆肥過程才能作為肥料，已大為縮短處理時間。整體而言，豬皮渣利用黑水虻處理可以完全取代烘乾及堆肥工作，並可達到循環經濟的目的。

而且黑水虻幼蟲亦可運用作為雞隻及水產養殖飼料，對於蟲糞作肥料及幼蟲作為飼料，此為另一課題，並不在此研究內探討。

5.3 二氧化碳排放減量

燃燒每公升燃料油相當於產出 3.111 kg-CO₂、使用每 kW 電力相當產出 0.612 kg-CO₂ (能源局, 2011)。以本案例豬皮渣廢棄物使用黑水虻處理及與烘乾進行比較，處理每噸豬皮渣廢棄物可減少燃料油使用量 36.7 L，及烘乾電力使用 108 kW。相對可減量 CO₂ 排放量 180.27 kg-CO₂ (36.7*3.111+108*0.612)。案例內食品廠每年產出動物渣廢棄物約 500 噸，預估每年可以減少 CO₂ 排放量 90,135 kg-CO₂。

5.4 整體效益評估

以本案例食品廢棄物減量而言，將每噸豬皮渣廢棄物含水率由 70% 降低到 20%，需脫除水量為 625 kg (=1,000(1-(1-0.7)/(1-0.2)))。將豬皮渣廢棄物內水量移除，分別針對傳統蒸發烘乾法及黑水虻幼蟲處理法進行評估，相關評估數值如表 7 所示。處理每噸廢棄物，在不考慮設備投資固定成本下，清運成本 3,500 元，每噸廢棄物水分減量 625 kg 可降低清運處理成本 2,188 元，操作上使用黑水虻幼蟲處理比使用烘乾設備烘乾，節省成本約 875 元；整體而言，處理每噸豬皮渣廢棄物，全部成本可降低 3,063 元。案例內食品廠每年產出動物渣廢棄物約 500 噸，可減少清運處理成本 1,094,000 元，相對操作成本全年亦可節省為 437,500 元。所以全年節省成本可達 1,531,500 元。

對於環境改善而言，黑水虻處理法並無惡臭產出，Sheppard(1983) 及 Furman et al.(1959) 研究亦指出黑水虻對人類完全無害，對環境非常安全，黑水虻成蟲既不攜帶病菌，也不侵入人類的居住環境。而相對於其他處理方式，則必須注意到有機物發酵產生惡臭、蚊蟲等存放造成環境衛生危害、甚至衍生疾病等問題。而動物渣廢棄物經黑水虻處理後殘渣為幼蟲排出蟲糞，此經過幼蟲體內厭氧消化處理後的蟲糞可直接作為土壤改質劑使用，另預蛹前的五齡幼蟲亦可收集作為動物飼料出售，此部分可完全將廢棄物資源化，所以可再進一步降低處理費用，甚至有額外獲利產出。所以黑水虻處理法應是較為符合食品廠食品廢棄物處理的優良方法。

至於黑水蛇處理最大問題點為需要室內空間進行養殖，而養殖過程中需須注意防治螞蟻、蜘蛛、小鳥等其他動物侵入吃黑水蛇問題。

表 7 各案例處理每噸豬皮渣廢棄物成本效益評估

項目		單位	烘乾	黑水蛇
移除水量		kg/噸	625	
廢棄物處理節省成本		元/噸	2,188	
投資費用		元	1,200,000	50,000
	設備成本	元	1,000,000	50,000
	工程費用	元	200,000	----
操作費用		元	874.5	0
	燃料油需求	L/h	36.7	0
	燃料油單價	元/L	15	
	電力需求	kW	108	0
	單位電價	元/kW	3	
	黑水蛇幼蟲	元/g	無	自行養殖提供

六、結論

養殖黑水蛇用於去化廚餘等廢棄物已有非常多的成功案例，不僅可將廢棄物量減少，更可將處理後的蟲糞殘渣轉成土壤改質劑使用及成蛹前幼蟲做為動物飼料運用，完全達到廢棄物資源化再利用及循環經濟的目的。

本研究內，將食品廠內生產後的動物渣廢棄物經由黑水蛇處理去化，達到廢棄物減量的目的，初步用於豬皮渣廢棄物減量，成果良好重量可減少 55.07%，含水率降至約 20%，完全可取代傳統廢棄物烘乾、堆肥等方法；並可減少燃料油及電力使用，及降低 CO₂ 排放。案例內處理 1,000 kg 豬皮渣廢棄物可減少烘乾設備使用燃料油 36.7 L 及電力 108 kW，降低廢棄物操作處理成本 875 元，及降低 CO₂ 排放量 180.27 kg-CO₂；與降低的清運處理費用合計後，處理 1,000 kg 豬皮渣廢棄物成本可降低 3,063 元。案例內食品工廠，每年產出約 500 噸動物渣，經黑水蛇處理後預估可降低廢棄物處理費用 1,531,500 元，對於每年 CO₂ 排放亦可減少 90,135 kg-CO₂。

在環境污染改善方面，亦明顯改善廢棄物產生惡臭、蚊蟲等環境不佳問題，相對在廢棄物存放、清運及處理上均可有效改善。而且產出蟲糞亦可直接作為土壤改質劑取代堆肥處理方式。所以實際操作運用而言，養殖黑水虻法去化食品廢棄物，可完全取代食品廢棄物烘乾及堆肥程序。

食品廢棄物種類繁多，以廢棄物處理角度而言，運用黑水虻處理法是可以將大量食品廢棄物有效資源化的優良方案，以現今我國所面臨食品廢棄物處理問題，應是值得努力推廣方向。

參考文獻

- 王韻萱 (2018)，黑水虻飼養在不同飼料添加益生菌之發育及營養成分，國立中興大學昆蟲學研究所，碩士學位論文。
- 朱芬 (2019)，黑水虻 Black soldier fly，中國農業科學技術出版社，p11-15。
- 安新城、李軍、呂欣 (2010)，黑水虻處理養殖廢棄物的研究現狀，環境科學與技術，第 33 期，p113-116。
- 李中光、劉新校、侯佳蕙 (2013)，淺談污泥脫水及加熱乾燥技術，環保簡訊，第 20 期，p 2.1-2.9。
- 李峰、張可、金鑫等 (2016)，武漢亮斑水虻對豬糞除臭功能的研究，化學與生物工程，第 33 期，p28-33。
- 段紀義、陳庭堅 (2014)，熱泵乾燥機結合狹點技術用於污泥乾燥效益評估，工業污染防治，第 129 期，p59-76。
- 能源局 (2011)，燃料油及電力使用 CO₂ 排放係數，經濟部能源局。
- 梁世祥、楊庭豪、王思涵 (2019)，黑水虻在友善農耕上之開發與應用，有益昆蟲在友善農耕之應用研討會專輯，p77-84。

陸麗珠、鄧盾、馬平等 (2020)，黑水虻堆肥促畜禽糞便分解的研究進展，廣東農業科學，第 47(8) 期，p 110-117。

陳靜瑩 (2021)，循環經濟商業模式之研究 --- 以黑水虻為例，國立屏東大學行銷與流通管理學系，碩士學位論文。

張添晉、陳俞穎 (2008)，有機污泥之生物減量技術，廢棄物資源化專輯，p 66-77。

楊森 (2010)，熱帶地區連續培養亮斑扁角水虻 (*Hermetia illucens* L.) 和生物轉化豬糞研究，武漢華中農業大學，碩士學位論文。

鄭文勝 (2006)，豬皮明膠之萃取、澄清及應用之研究，國立嘉義大學動物科學系，碩士學位論文。

劉興、孫學亮、李連星等 (2017)，黑水虻替代魚粉對錦鯉生長和 \ 健康狀況的影響，大連海洋大學學報，第 32 期，p 422-427。

Bosch, G., Zanten, H.E.V., Zamprogna, A., et al. (2019), Conversion of organic resources by black soldier fly larvae: legislation efficiency and environmental impact, *Journal of Cleaner Production*, 222: p 355-363.

Cutrignelli, M.I., Messina, M., Tulli, F., et al. (2018), Evaluation of an insect meal of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) as soybean substitute; Intestinal morphometry, enzymatic and microbial activity in laying hens, *Research in Veterinary Science*, 117: p 209-215.

Furman, D.P., Young, R.D., Catts, E.P. (1959), *Hermetia illucens* (Linnaeus) as a factor in the natural control of *Musca domestica* Linnaeus, *Journal of Economic Entomology*, 52: p 917-921.

Gobbi, P., Martinez-Sanchez, A., Rojo, S. (2013), The effects of larval diet on adult life history traits of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), *European Journal of Entomology*, 110: p 461-468.

- Holmes, L.A., Vanlaerhoven, S.L., Tomeberlin, J.K. (2016), Lower temperature threshold of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) development, *Journal of Insects as Food and Feed*, 2: p 255-262.
- Jozefiak, D., Jozefiak, A., Kieronczyk, B.(2010), Insects-anatural nutrientl nutrient source for poultry-areview, *Ann. Anim. Sci.*, 16: p 297-313.
- Kumar, S., Negi, S., Mandpe, A., Singh , R.V., and Hussain, A. (2018),. Rapid composting techniques in Indian context and utilization of black soldier fly for enhanced decomposition of biodegradable wastes-A comprehensive review., *Enviro. Manage.*, 227: p 189-199.
- Lalander, C.H., Fidjeland, J., Diener, S.(2015), High waste to biomass conversion and efficient Salmonella spp. Reduction using black soldier fly for waste recycling, *Agron. Sustain. Dev.*, 35: p 261-271.
- Nguyen, T.T.X., Tomberlin, J.K., Vanlaerhoven, S., et al. (2015), Ability of black soldier fly (Diptera : Stratiomyidas) larvae to recycle food waste, *Environ Entomol.*, 44: p 406-410.
- Rehman, K.U., Rehman, A., Cai, M.M., et al. (2017), Conversion of Mixtures of dairy manure and soybean curd residue by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.), *Journal of Cleaner Production*, 154: p 366-373.
- Sheppard, C. (1983), Housefly and lesser fly control utilizing the black soldier fly in manure management systems for caged laying hens, *Environmental Entomology*, 12: p 1439-1442.
- Sheppard, C., Newton, G.L., Thompson, S.A., et al. (1994), A value added manure management system using the black soldier fly, *Bioresource Technology*, 50: p 275-279.

Sheppard, D.C., Tomberlin, J.K., Joyce, J.A., et al. (2002), Rearing Methods for the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae), *Journal of Medical Entomology*, 39: p 695-698.

Smith, J.M., Van Ness, H.C. (1987), *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, McGraw-Hill International Editions, 4e.

Webster, C.D., Rawles, S.D., Koch, J.F., et al. (2016), Bio-Ag reutilization of distillers dried grains with solubles (DDGS) as a substrate for black soldier fly larvae, *Hermetia illucens*, along with poultry by-product meal and soybean meal as total replacement of fish meal in diets for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, *Aquacult. Nutr.*, 22: p 976-988.