

112年度氣候變遷創意實作競賽

決賽作品說明書

隊伍編號	14 (註：由執行單位統一填寫)
隊伍名稱	太空wet基
作品中文名稱	燒包菇菇
作品英文名稱	Burn Burn Der!

參賽學校：國立勤益科技大學

指導老師：謝瑞青

團隊成員：廖朕浩、謝易騏、張介謀

目錄

摘要 Abstract.....	4
一、動機及設計構想.....	5
(一)動機及目的	5
(二)設計構想	6
1. 運作原理	6
2. 作品創意設計	7
二、作品說明.....	9
(一) 作品展示	9
(二) 作品設備說明	9
1. 迴轉式乾燥機 (Rotary Pre-dryer & Rotary Dryer)	9
2. 引風機(Blower).....	12
3. 生質能熱水鍋爐(Boiler)	13
4. 有機朗肯循環系統(organic Rankine cycle, ORC)	17
(三) 作品模擬數據	18
1. 乾燥 SMS 消耗的熱量	18
2. 引風機耗功	18
3. 生質能熱水鍋爐效率	19
4. 有機朗肯循環系統性能分析	19
5. 生質能發電系統熱效率	19
三、創意特點及說明	20
(一) SMS 作為燃料的優勢	20
(二) 創新方法的具體效益	21
(三) ORC 冷凝廢熱的應用	22
(四) 碳循環	23
(五) 資源創生及環境永續	23
(六) 乾燥與燃燒過程中產生的物質	24
(七) 永續發展	25
四、作品應用場域及發展潛能	26

(一) 應用範圍	26
(二) 發展潛能	27
五、 結論	28
六、 未來展望	28
七、 工作分配	30
八、 作品設計花絮	31
九、 參考文獻	32

摘要

本作品開發一個具有乾燥功能的創新生質能發電系統，創意核心部分主要以回收 ORC 的冷凝廢熱及鍋爐排放廢熱對 SMS 乾燥，並對乾燥後 SMS 燃燒發電。結果顯示發電容量達 175 kW，年發電量及減碳量分別 13 GWh 及 7,025 噸，系統熱效率達 59.28%。

Abstract

The present study develops an innovative biomass power generation system with a drying function. Waste heat from ORC condensation and exhaust of boiler is used to dry waste SMS, which is burned to generate electricity. The system has a power generation capacity of 175 kW, with an annual output of 13 GWh and a carbon reduction of 7,025 tons. The system achieves a thermal efficiency of 59.28%.

一、動機及設計構想

(一)動機及目的

台灣人有多愛吃香菇？菇類因為營養價值高，是美味佳肴的常客，根據台灣菇類產業發展狀況[1]調查，自從在英國園藝學會發表香菇栽培技術起，至今已有百年以上的歷史，曾享有洋菇王國的美名，但隨著工業發展及農業勞動力短缺，栽種香菇的方式也跟著改變，從日本引進塑膠瓶技術到現今相當成熟的太空包技術，產量隨科技的進步逐漸提升，同時也造成廢棄物的數量增生，我們曾經與當地菇農合作，協助開發自動化設備，解決勞動力不足等問題，進而發現台灣人一年吃近百億元的菇類，為了滿足供需及出口外銷，**每年都需使用大量的香菇太空包來進行菇類栽種，以台中新社為例，年產「上億個」廢棄太空包，是全台香菇量的45%，重量達15至20萬噸[2]**，農業廢棄物的產量相當驚人，礙於法規及處理廢棄香菇太空包的成本，在過去近十年的廢棄物處置多為在地掩埋及焚燒，造成環境的衝擊（圖 1和圖 2），就地掩埋及置放，造成河川及土壤污染，所以使用過的香菇太空包(Spent mushroom substrates, SMS)如何有效回收及利用是近幾年來眾多學者相當關心的議題。



圖 1 SMS 任意堆置示意圖[3]



圖 2 SMS 包裝塑膠袋於新社大排[3]

現今台灣處置 SMS 的方式眾多，例如將 SMS 與塑膠袋進行分離，將潮濕的木屑添加木黴菌，開發蔬果和花草種植的專用介質及肥料，或是製成貓砂，創造廢棄物的價值，也有學者及研究單位將廢棄菇包製成生質燃料是一項可行的方案[4,5]，下圖 3為廢棄太空包處置示意圖。



圖 3 台灣處置廢棄菇包(SMS)的方式

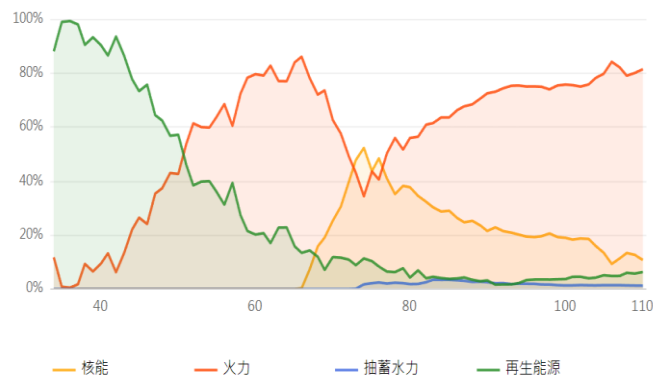


圖 4 台電系統歷年發購電量構成比[5]

全球有限的一次性能源正在逐漸消失殆盡，生質能源的開發是一項能夠減緩氣候變遷衝擊與永續經營的方案，淨零碳排的意識逐漸抬頭以及目前燃料市場趨勢，生質能源的使用率在近幾年增加許多[7]，我國在再生能源發電的比例在近10年也有些微幅度的提升，當中包含沼氣及垃圾廢棄物(Refuse Derived Fuel)[5]，如圖 4所示。根據國內外文獻回顧，農業廢棄物皆透過乾燥及發酵製成生質燃料，大多為改善成分重新作為生產香菇的基質、吸附重金屬之吸附劑及肥料，但將潮濕的 SMS 乾燥後燃

燒發電的研究鮮少，大多在於分析研究太空包之燃料特性，因此本作品為能呼應我國2050年淨零排放路徑及策略及幫助在地菇農解決農業廢棄物等問題，故整合乾燥設備、燃燒鍋爐及有機朗肯循環等系統，以創新方法設計生質能系統，希望能減少農業廢棄物對環境的影響，並透過循環經濟之方法使資源創生，以達到永續及循環再生等精神。

本作品設計的生質能電廠以乾燥的 SMS 為燃料，燃燒成分相較於化石燃料單純，台灣的垃圾焚化爐運行多年，同時也透過燃燒垃圾(廢棄物)產生電力，其煙氣中的有毒物質及對環境有害的成分經過過濾皆可符合排放標準，國外也有使用農業廢棄物燃燒發電的研究[8,9]，因此由上述現有技術可看出本作品的構想具可行性。

另外本作品設計對照組以分析 SMS 乾燥後燃燒的發電的效益，通常 SMS 的含水量極高(約60%~80%)，必需降低其水分才夠燃燒，若直接使用熱風機加熱空氣進行乾燥，以每小時乾燥2,283.1公斤的 SMS 計算所需乾燥熱量及發電效益，由圖 5 得知乾燥 SMS(從水分75%至5%)的過程，熱風機乾燥 SMS 所需的耗能為2184.8 kW(利用電能加熱空氣乾燥 SMS)，而系統的淨發電量為221.484 kW，由此可看出乾燥後的發電量遠比乾燥 SMS 所需的電力還小，因此可看出若用傳統電力方法乾燥太空包，再進行燃燒發電效益將會導致負能量，因此本作品將提出一創新架構，增加能源的使用率，使 SMS 作為生質燃料的熱效率進一步提升。

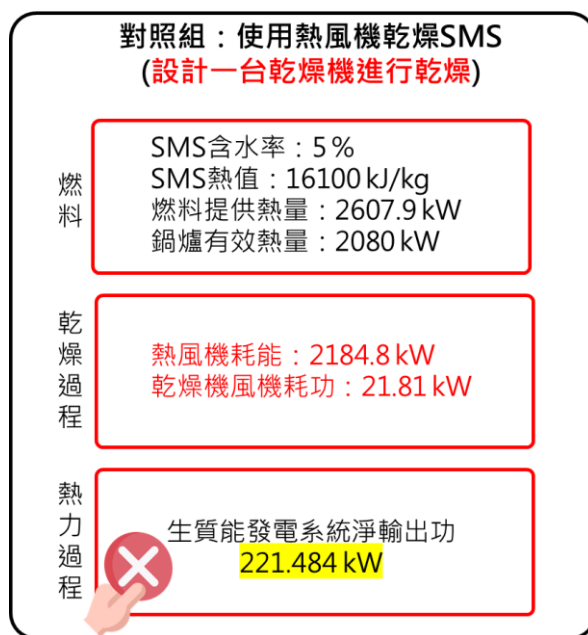


圖 5 用額外電力乾燥 SMS 之系統發電效能計算

(二)設計構想

1. 運作原理

由於栽種香菇的時候需要恆溫及控制濕度，導致使用完的香菇太空包非常潮濕，水分會使得太空包裡的木屑不易燃燒和熱值下降，因此需將 SMS 脫水降低其含水率，並以熱風乾燥以增加其熱值(如圖 6所示)。在本創作中將會有兩階段的乾燥，第一階段係由有機朗肯循環 (organic Rankine cycle, ORC) 的冷凝廢熱進行預先乾燥(一次乾燥)，第二階段則由鍋爐燃燒產生的煙氣中的廢熱進行最終乾燥(二次乾燥)，最後燃燒 SMS 產生熱能供 ORC 發電，完成整個生質能發電系統的循環。

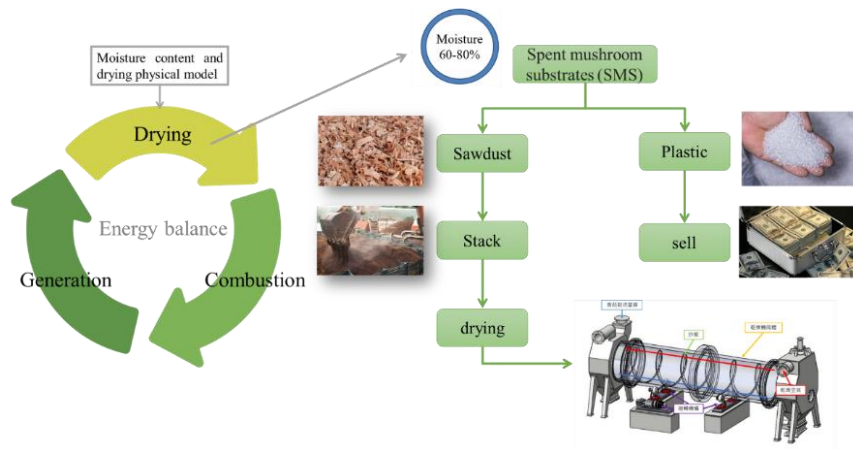


圖 6 潮濕 SMS 處理流程圖

2. 作品創意設計

本作品的生質能發電系統由熱源、冷源、煙氣、ORC、乾燥及空氣等6種迴路組成，下表 1 為各迴路種類及功能。其中 ORC 系統是近年來崛起的熱電技術，其優勢是能夠將較低階熱能轉換成電能之技術，尤其應用領域非常廣泛，包含地熱、廢熱回收及生質能，從期刊文獻資料可看出，截至2017 年 ORC 應用於生質能已達到301MW [10]，顯見此技術應用於生質能已非常成熟。

表 1 本作品之生質能發電系統迴路種類及功能介紹

迴路種類	功能
熱源迴路 (Heat Source Circuit)	與 ORC 迴路進行熱交換，提供發電熱量
冷源迴路 (Cooling Circuit)	將 ORC 迴路發電後之冷凝器廢熱透過空氣傳遞給空氣迴路
煙氣迴路 (Flue gas Circuit)	鍋爐排放的煙氣與空氣進行熱交換提供乾燥熱量
ORC 迴路 (ORC Circuit)	系統內部的工作流體與熱源迴路進行熱交換，工作流體產生相變化後產生機械功
乾燥迴路 (Dryer Circuit)	透過煙氣迴路與空氣迴路熱交換，用於乾燥 SMS(二次乾燥)
空氣迴路 (Air Circuit)	將 ORC 冷凝器之廢熱用於預乾燥 SMS(一次乾燥)

本作品具有兩階段的乾燥，首先脫水後的 SMS 利用 ORC 之冷凝器廢熱進行預乾燥(第一階段乾燥)，其主要原因係 ORC 熱電系統效率較低，將近85%的廢熱經由冷凝器排出，為了利用此廢熱，本作品提高 ORC 之冷凝溫度，並以空氣進行散熱，排出的熱空氣對含水率較高的 SMS 進行預乾燥。雖然提高冷凝溫度 ORC 系統效率會降低，但使用冷凝器的廢熱對整體的熱效率將有很大的提升。不過，提高冷凝溫度對系統發電效能及對含水率的下降有其關聯性，此部分的研究在國際期刊上並無相關文獻，因此本作品若能夠開發成功對我國農業廢棄物將會有相當大的助益，圖 7 為本作品的創新架構圖。

第二階段係於第一階段預乾燥後，以生質能熱水鍋爐之廢煙氣進行二次乾燥，除了有效降低 SMS 的含水率外，也可進一步利用煙氣之剩餘熱能，本作品提出此創新架構，主要目的是增加系統之熱效率。

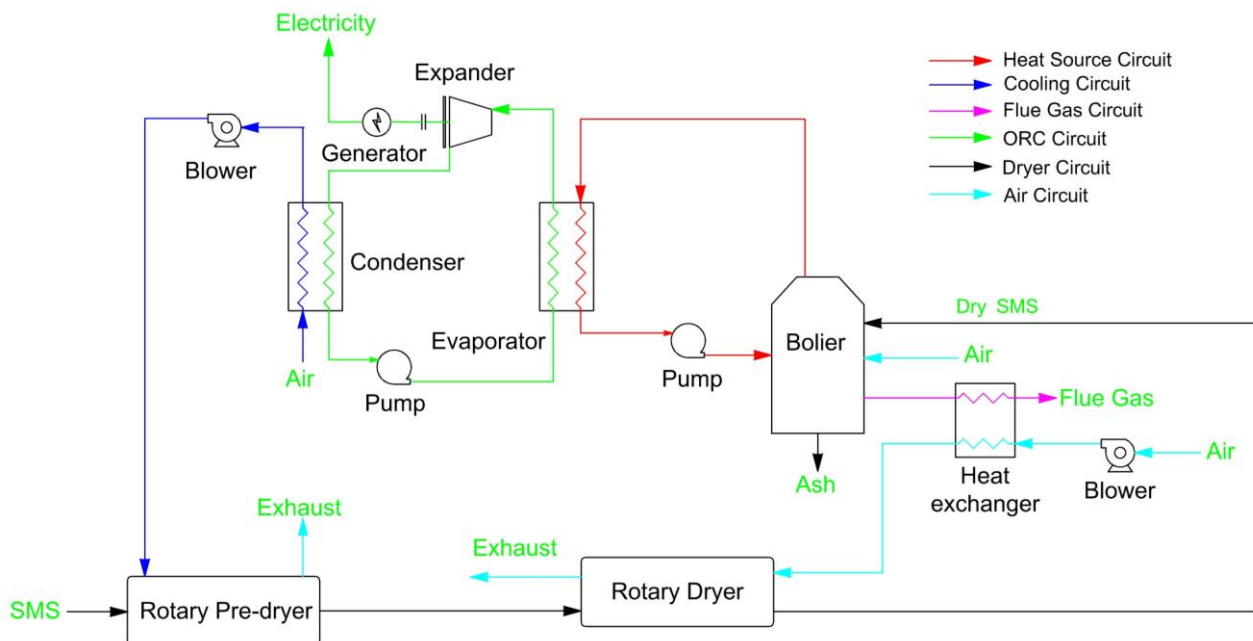


圖 7 生質能發電系統創新架構圖 (Patent pending)

3. 生質能發電流程說明

本系統是由迴轉式乾燥機、生質能熱水鍋爐及有機朗肯循環(organic Rankine cycle, ORC)所組成，故本系統將根據物理學、熱力學及熱傳學計算，並遵守能量及質量平衡完成系統設計，作品部件說明會有細部的設計說明，下列針對圖 8 進行步驟解說。

- (1) 站點1至站點2：潮濕的 SMS 會進入迴轉式乾燥機，透過 ORC 的冷凝器廢熱進行預乾燥(一次乾燥機)。
- (2) 站點2至站點3：預乾燥後的 SMS 再由鍋爐煙氣進行二次乾燥(二次乾燥機)。
- (3) 站點3至站點4：乾燥後的 SMS 提供生質能鍋爐進行燃燒產生能量。
- (4) 站點4至站點5：鍋爐燃燒後產生高溫煙氣，透過熱交換器與水進行熱交換。
- (5) 站點5至站點6：與鍋爐煙器進行熱交換後的提供熱水於 ORC 發電產生電力。
- (6) 站點6至站點1：發電後的 ORC 冷凝廢熱對潮濕的 SMS 進行預乾燥。
- (7) 站點5到站點2：燃燒 SMS 產生的熱量除了提供熱量予 ORC 發電外，較低溫的熱煙氣排出鍋爐後進入二次乾燥機。

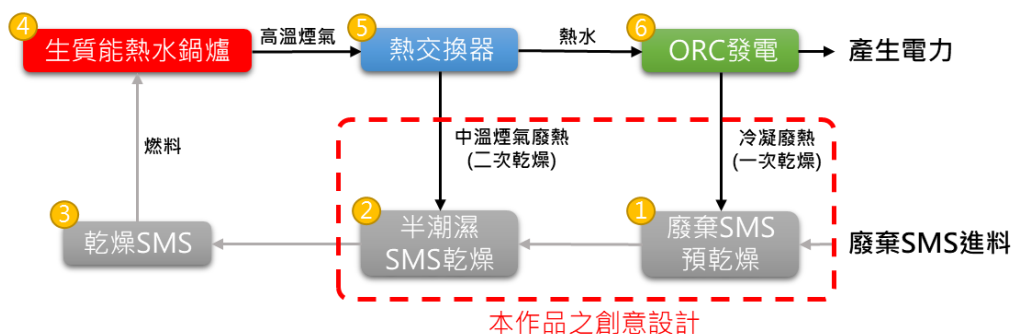


圖 8 創新架構之生質能發電系統方塊圖

二、作品說明

(一)作品展示

本創作利用3D圖讓系統能夠更加清楚呈現，從圖9中可看出我們會使用兩個乾燥機進行SMS的乾燥，其中將ORC發電系統冷凝廢熱提供給迴轉式預乾燥機，並將預一次乾燥後之SMS傳送至迴轉式乾燥機進行最後乾燥，而生質鍋爐燃燒乾燥後之SMS，將煙氣中熱量以熱源迴路方式提供給ORC系統進行發電，煙氣經過第一次取熱後，再將以降溫之煙氣輸送至迴轉式乾燥機對SMS進行二次乾燥。

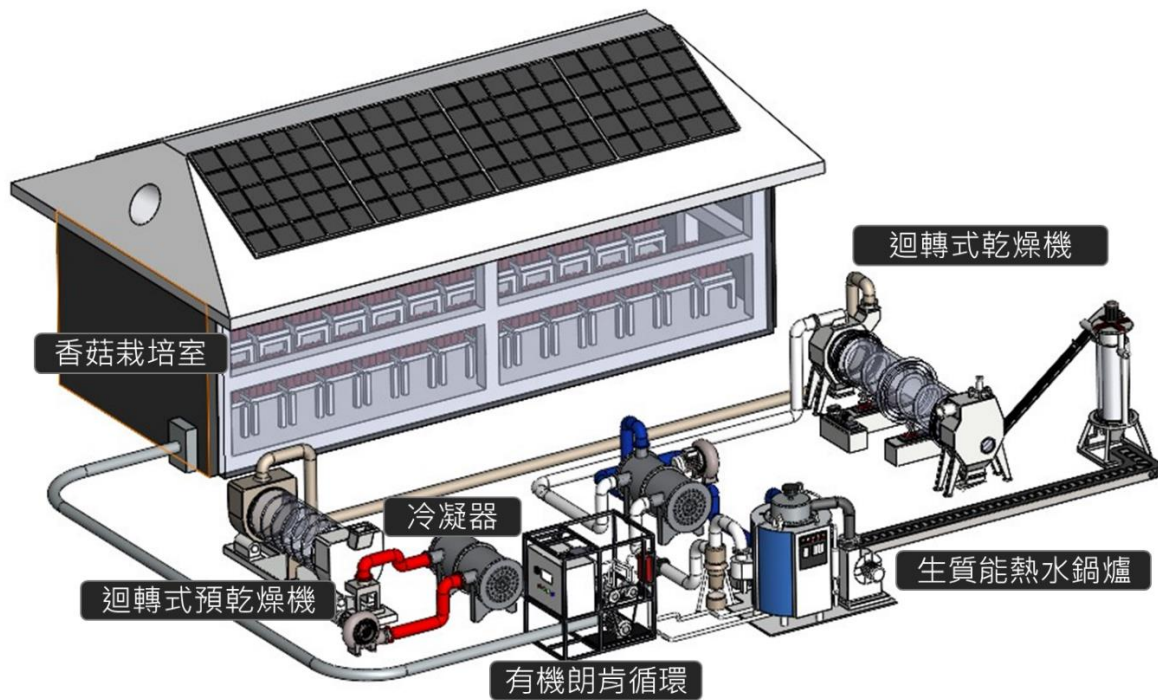


圖 9 生質能系統3D圖 (Patent pending)

(二)作品設備說明

根據台灣一年有15至20萬噸的香菇太空包，因此本作品將設計處理量能為22,831公斤/小時，其中本作品係將乾燥、燃燒及發電系統等物理及化學方程式建置於Matlab程式語言中進行計算，其中子系統包含：迴轉式乾燥機、引風機、生質能熱水鍋爐及有機朗肯循環等模組，其所使用之相關物理與數學模型將在本節詳細介紹：

1. 迴轉式乾燥機 (Rotary Pre-dryer & Rotary Dryer)

本作品選用迴轉式乾燥機進行廢棄的SMS乾燥，因為該設備適應的材料廣，乾燥過程可使木屑均一性，讓每批燃料品質都能夠相符，能夠應用果渣、木屑、木材殘渣及固體廢物，且具連續操作性，結構簡單易於維修，非常適合用於乾燥水分較多的物料，但是SMS不是一項很好的生質燃料，水分的多寡影響燃料的品質及熱值，迴轉式乾燥機能利用熱風乾燥SMS讓燃料品質提升，圖10為文獻資料，從圖中得知當含水量提高時，燃料的熱值就會隨之下降。

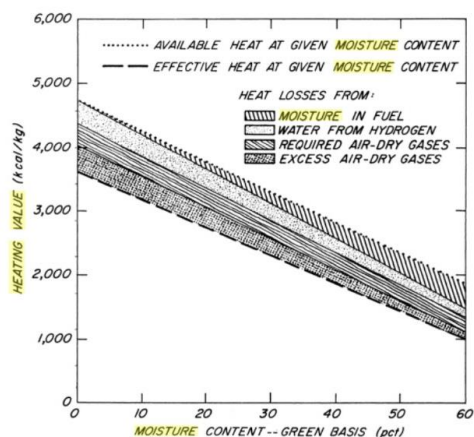
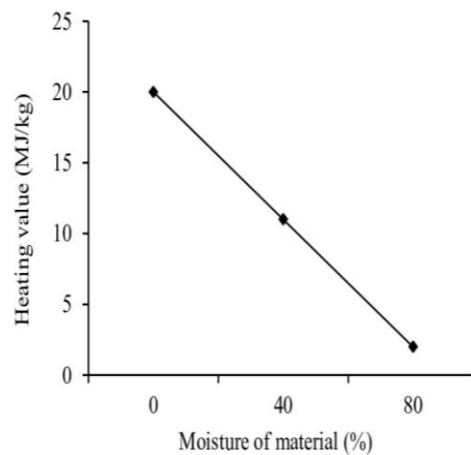


Figure 2.—Relationship of heating value of a typical wood fuel to moisture content (a higher heating value of 4,720 kcal/kg, stack gas temperature of 260° C, and 40 pct excess air is assumed).

(a)



(b)

圖 10 物料含水量與燃料熱值的關係[11]

乾燥過程跟運作原理會根據乾燥機種類有關，如穿流型、機械攪拌、流體化床、氣流及迴轉式乾燥機等，表 2 呈現各式乾燥機的種類及優缺點。本作品使用迴轉式乾燥機進行乾燥，將 ORC 的冷凝廢熱及鍋爐煙器進行 SMS 的乾燥，該設備如圖 11 所示，在物理模型上設計 SMS 與乾燥空氣的方向相反，稱之為逆流乾燥機，此方法可以使物料成品的含水量較低，但是所需的溫度或是能量就要越多，物料由送料口進入迴轉式乾燥機的筒體，筒體內圍繞的結構為抄板，會在旋轉過程中攪拌物料，增加與熱空氣的接觸面積，達到乾燥目的。

表 2 生物質乾燥機設備應用與優缺點[12]

乾燥機種類	應用材料	優點	缺點
皮帶式	木屑、木樹皮、木材殘渣、鋸末、污泥、甘蔗渣	- 材料彈性大 - 低氣體排放 - 低火災風險	- 運轉功率較大 - 殘留水分較少 - 佔地空間大
迴轉式	果渣、木皮、木屑、木材殘渣、甘蔗渣、柑橘和蔬菜固體廢物	- 適用材料廣 - 產品均一性 - 通用性較好	- 氣體排放量大 - 火災隱患 - 價格較昂貴 - 佔地面積大
氣流式	木屑、木材廢料	- 設計簡單 - 高濕排風 - 乾燥時間短	- 安裝成本高 - 用電量大 - 乾燥需大量熱量 - 需粉粉碎物料

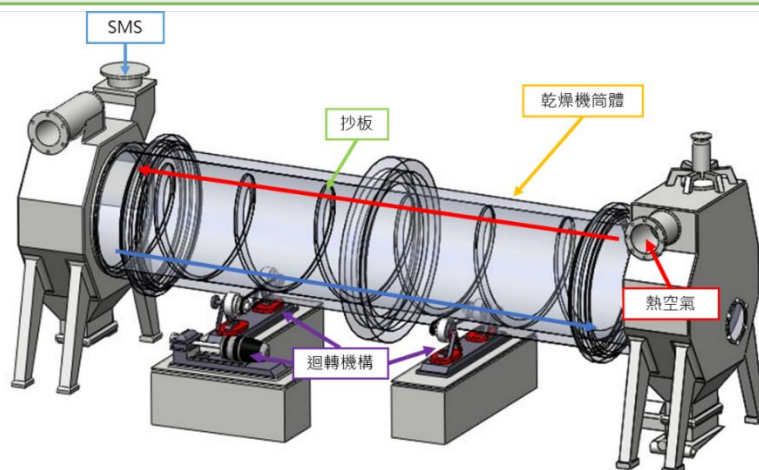


圖 11 逆流迴轉式乾燥機3D 圖

乾燥時需要計算進出口熱空氣的含水量、相對濕度、濕球溫度及熱焓值，還有物料升溫過程及水分蒸發的熱量，因此乾燥過程需考慮能量及質量平衡，並考量傳熱損失及工程設計裕度，下表 3 至表 6 為乾燥過程中之計算公式。

(1) 乾燥機設計-空氣計算

表 3 空氣狀態之狀態方程式

絕對濕度 (H_{abs} , absolute humidity)[13]	$H_{abs} = \left(\frac{M_v}{M_{da}}\right) \frac{p_w}{P - p_w}$
飽和濕度 (H_{sat} , saturated humidity)[14]	$H_{sat} = \left(\frac{M_v}{M_{da}}\right) \frac{p_{ws}}{P - p_{ws}}$
相對濕度(H_{rh} , relative humidity)[15]	$H_{rh} = \frac{H_{abs}}{H_{sat}} \times 100\%$
飽和蒸氣壓 (p_{ws} , saturation pressure)[16]	$\ln p_{ws} = \frac{C_8}{T_d} + C_9 + C_{10}T_d + C_{11}T_d^2 + C_{12}T_d^3 + C_{13} \ln T_d$
空氣熱焓值(I , humid enthalpy)[17]	$I = (C_g + C_v \times H)T_d + \gamma_0 \times H_{abs}$

(2) 乾燥機設計-物料狀態

表 4 物料狀態方程式

乾燥物料質量流率平衡計算[18]	$\dot{m}_{sin}(1 - W_{in}) = \dot{m}_{sout}(1 - W_{out})$
水分蒸發量[18]	$W = \dot{m}_{sin} - \dot{m}_{sout}$

(3) 乾燥機設計-空氣熱交換過程

表 5 空氣熱交換狀態方程式

出口空氣熱焓值[19]	$I_{out} = I_{in} + [-(q_m + q_{loss}) + C_w \times T_{sin}] \times (H_{a,out} - H_{in})$ $I_{out} = (C_g + C_v \times H_{a,out})T_{out} + \gamma_0 \times H_{a,out}$
水分蒸發物料升溫熱量[19]	$q_m = \frac{\dot{m}_{sin} \times C_m \times (T_{sout} - T_{sin})}{W}$
蒸發過程熱損失[19]	$q_1 = q_0 \times 20\%$
乾燥過程所需空氣用量[19]	$l = \frac{\dot{m}_{sin} - \dot{m}_{sout}}{H_{out} - H_{in}}$

(4) 乾燥機設計-乾燥熱量計算

表 6 乾燥熱量計算方程式

濕球溫度經驗式[16]	$H_{in} = \frac{(2501 - 2.326 \times T_w)H_w - 1.006(T_{in} - T_w)}{2501 + 1.86T_{in} - 4.186T_w}$
蒸發水分熱量[20]	$Q_1 = m_w \times \Delta H_w$
濕球溫度升溫到出口溫度熱功率[20]	$Q_1 = m_w \times \Delta H_w$
物料升溫到濕球溫度熱功率[20]	$Q_3 = m_w C_{pw}(T_w - T_{sin})$
物料升溫到所需溫度熱功率[20]	$Q_4 = \dot{m}_{sout} C_{ps}(T_{sout} - T_{sin})$
物料含水量升溫至出口溫度熱功率[20]	$Q_5 = \dot{m}_{sout} W_{out} C_{pw}(T_{sout} - T_{sin})$
乾燥時總熱功率消耗(α 為安全係數)[20]	$Q_{total} = (1 + \alpha)(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5)$

本作品為確保迴轉式乾燥機之熱力模型具可靠度，因此計算乾燥過程的公式皆引用國內外期刊及文獻，提升創意構想的強度及正確性，故將模型進行文獻比對驗證，如下表 7 所示。

表 7 迴轉式乾燥機模型驗證

Ref.	Air rate (kg/s)	本作品流量 (kg/s)	Error (%)
Mujumdar et al. [20]	1.6719	1.672	0.08
Echeeri and Maalmi [21]	0.55	0.54	0.45
Bacelos et al. [22]	0.1717	0.1685	1.86
Kamke and Wilson [23]	1.54	1.535	-0.2

2. 引風機(Blower)

進入乾燥機的熱風都需透過引風機使空氣流動，是生質能發電系統重要的部件，將新鮮空氣引入至熱交換器與 ORC 冷凝廢熱及鍋爐煙氣進行熱交換，其中乾燥機所需的乾燥風量就由引風機提供，風量及靜壓是影響引風機耗能的關鍵，因此引風機選型需要根據需求篩選，每一種風機都有適合的操作範圍，本作品由熱工基礎[24]風機選型及設計挑選風機進行使用，根據風量及靜壓計算引風機耗能，圖 12 為風機的種類示意圖，圖 13 則為風機常用的性能曲線圖(PQ 曲線圖)。

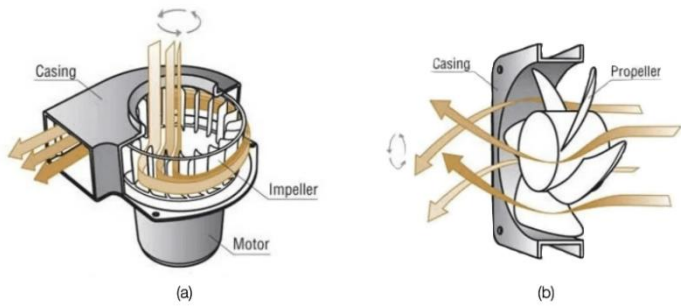


圖 12 風機種類(a 為離心式 b 為軸流式)[25]

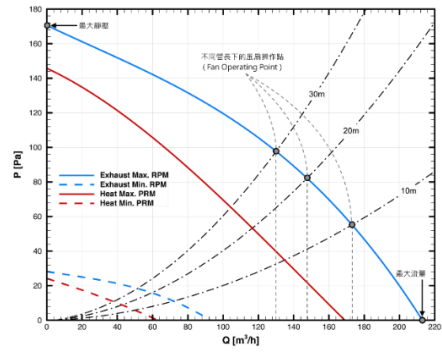


圖 13 風機風扇的性能曲線[25]

3. 生質能熱水鍋爐(Boiler)

SMS 為栽培香菇後的木質纖維素副產品，食用菌生物降解僅達40~80%，因此剩下的殘留物多為真菌菌絲、木質纖維素生物質(木屑、鋸末及稻草)、改良劑(石膏)及營養物質(有機)，其中組成會因應地點及種植香菇的類型而產生個別的差異，在此針對特定目標進行 SMS 成分分析非常重要，表 8 為文獻整理之 SMS 組成。

表 8 各種 SMS 的化學組成及特徵[26]

Mushrooms specie	Substrate	Proximate analysis (VM:FC:Ash, %)	Fibre analysis (%)	Elemental analysis (C:H:N:S:O)
Agaricus bisporus	Straw, horse manure	43.1: 10.2: 46.8	Ce:Hc:L = 41.2: 0: 21.2	58.2: 5.6: 2.8: 1.2: 32.3
A. bisporus	Wheat straw, horse manure, gypsum	49.0: 7.3: 37.5		29.3: 3.5: 1.9: 0.8: 26.9
Flammulina velutipes	Rice bran 43.4%, corncob 37.0%, bran 11.0%, beet residue 6.9%, CaCO ₃ 0.9%, quicklime 0.9%	TS/VS = 96.0/80.4, Ash 0.1%	Ce:Hc:L = 17.0: 28.5: 8.0	C/N = 39.7/1.5
Lentinula edodes	Birch sawdust 28%, wheat grain 3.5%, wheat bran 3.5%, CaCO ₃ 0.35%	-	G:X:L = 57.6: 31.0: 23.3	48.8: 6.4: 0.5: 0.03: 42.4
L. edodes	Eucalyptus sawdust, rice and wheat bran	63.2:28.9:7.9	-	45.7: 4.5: 1.0: 0: 40.9
Pleurotus sp.	-	-	Ce:Hc:L = 36.2: 22.2: 12.0	49.8: 0: 0.85: 0: 0
P. eryngii var. tuoliensis	Cottonseed hull 40%, corncob 30%, bran 20%, corn flour 8%, lime 1.5%, gypsum 0.5%	TS/VS = 96.3/86.4, Ash 0.07%	Ce:Hc:L = 22.1: 25.8: 9.5	C/N = 39.0/1.7
P. eryngii	Sawdust 48%, straw 24%, wheat bran 20%, corn flour 5%, sugar 1%, gypsum 2%	TS/VS = 46.4/90.9	-	C/N = 41.7/2.2
P. florida	TS/VS = 24.4/64.6	-	-	19.6: 4.8: 1.6: 0.16
P. florida	Cottonseed husk 30%, corn cob 70%, and N and P fertilizers	62.9:17.3:10.9	Ce:Hc:L = 22.7: 18.5:13.6	42.5: 5.8: 2.2: 0.1: 29.7

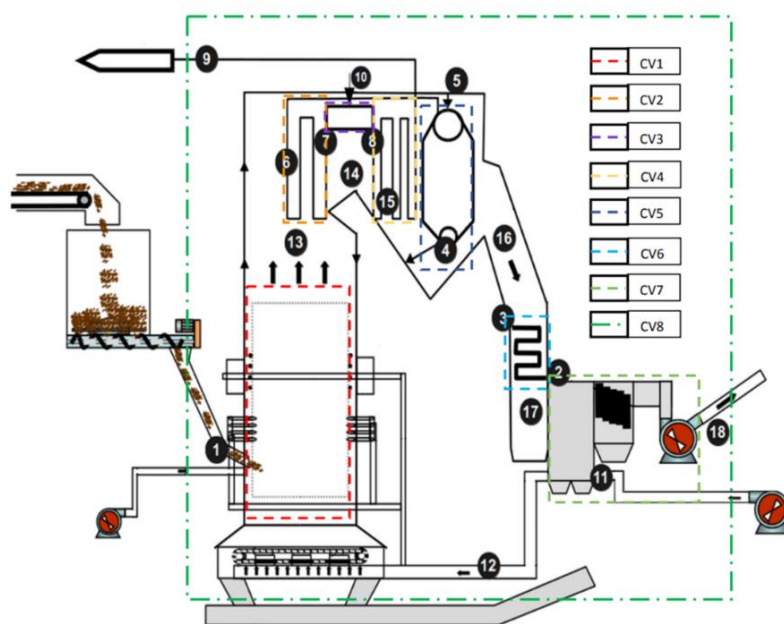
A = Arabinan, Ce = Cellulose, FC = Fixed carbon, G = Glucan, Hc = Hemicellulose, L = Lignin, TS = Total solid, VM = Volatile matter, VS: Volatile solid, X = Xylan

根據 SMS 的元素成分可以進行生物質所含能量之估算，Qian 等人[27]歸納許多學者近20年的研究及實驗，計算經驗式由表 9 提供，可將碳(C)、氫(H)、氮(N)、硫(S)及氧(O)之比例計算燃料熱值，其中元素比例也會影響鍋爐設計。SMS 進入鍋爐燃燒後，提供有效熱量至發電系統，剩餘的煙氣會經由空氣預熱器與新鮮的空氣進行熱交換，加熱後的空氣則會與 SMS 進行二次乾燥，鍋爐的效率則受煙氣溫度、風量、過量空氣係數及燃料種類影響。

表 9 生物質熱值估算之經驗式[27]

No.	Year	Correlations	Analysis Basis	Unit
Equations(1)	2002	$HHV = 0.3491C + 1.1783H + 0.1005S - 0.1034O - 0.0151 N - 0.0211ash$	Ultimate	MJ/kg
Equations(2)	2005	$HHV = 19.914 - 0.2324ash$	Proximate	MJ/kg
Equations(3)	2005	$HHV = -3.0368 + 0.2218VM + 0.2601 FC$	Proximate	MJ/kg
Equations(4)	2005	$HHV = 0.3259C + 3.4597$	Ultimate	MJ/kg
Equations(5)	2005	$HHV = 3.55C2 - 232C - 2230H + 51.2C \times H + 131 N + 20600$	Ultimate	KJ/kg
Equations(6)	2011	$HHV = -2.057 - 0.092A + 0.279VM$	Proximate	MJ/kg
Equations(7)	2011	$HHV = -3.393 + 0.507C - 0.341H + 0.067N$	Ultimate	MJ/kg
Equations(8)	2011	$HHV = -3.440 + 0.517(C + N) - 0.433(H+N)$	Ultimate	MJ/kg
Equations(9)	2011	$HHV = 0.1905VM + 0.2521FC$	Proximate	MJ/kg
Equations(10)	2011	$HHV = 0.2949C + 0.8250H$	Ultimate	MJ/kg
Equations(11)	2012	$HHV = 19.2880 - 0.2135 VM/FC + 0.0234 \times FC/ASH - 1.9584 \times ASH/VM$	Proximate	MJ/kg
Equations(12)	2012	$HHV = 20.7999 - 0.3214 \times VM/FC + 0.0051 \times (VM/FC)^2 - 11.2277 \times ASH/VM + 4.4953 \times (ASH/VM)^2 - 0.7223(Ash/VM)^3 + 0.0383 \times (ASH/VM)^4 + 0.0076 \times FC/ASH$	Proximate	MJ/kg
Equations(13)	2013	$HHV = 157.34(VM + FC) + 4243.97$	Proximate	KJ/kg
Equations(14)	2014	$HHV = 0.367C + 53.883O/(2.131C^2 - 3.299) + (C \cdot H - 115.971)/(10.472 \cdot H + 0.129C \cdot O) - 91.531/(35.299 + N) + 232.698/(77.545 + S)$	Ultimate	MJ/kg
Equations(15)	2014	$HHV = 0.365 \times FC + 0.131 \times VM + 1.397/FC + 328.568 \times VM/(10283.138 + 0.531 \times FC^3 \times ash - 6.863 \times FC^2 \times ash)$	Proximate	MJ/kg

物料燃燒時會在燃燒室達到預期溫度，為避免產生世紀之毒-戴奧辛，因此燃燒室溫度設計必須為1000°C以上，戴奧辛會在物料悶燒於250~400°C時產生最多，以往 SMS 隨意置放或焚燒就會有戴奧辛的問題產生，且塑膠袋尚未分離的情況之下燃燒，其危害對於環境更是不可勝數，只要將燃燒室溫度控制在850°C以上就能夠避免上述問題，常見的垃圾焚化廠也會使用控制燃燒溫度的方式減少毒物產生，但是若超過1200~1500°C時，此時會促使氮氧化物的產生，是一種神經毒氣，因此本作品在設計生質能鍋爐都會將上述問題列入考量，圖 14為常見的生質能熱水鍋爐型式，燃燒後的煙氣會與省煤器與空氣預熱器進行換熱，經過過濾符合排放標準才會排放至大氣。本作品應用化學平衡及燃燒反應設計鍋爐基本設計條件，並遵照能量與質量守恆，大氣中的氮氣與氧氣的體積比例為3.76，因此在燃燒過程當中，當爐內進入1m³的氧氣時同時會有3.76m³的氮氣存在，燃料元素包含碳、氫、硫及氧，在進行理論空氣量計算，需將燃料所包含的氧折合成空氣量並在計算時扣除，空氣的氧體積分數為21%，因此1kg 氧所含有的體積為3.33m³，下表 10到表 12為設計生質鍋爐之數學模型。



CV1 Furnace, CV2 Primary Superheater, CV3 Desuperheater, CV4 Secondary superheater, CV5 Boiler Bank, CV6 Economizer, CV7 Air Preheater, CV8 Boiler

圖 14 生質能鍋爐構造示意圖[28]

(1) 生質能熱水鍋爐設計-燃燒空氣量

表 10 燃燒反應與空氣用量計算式[29]

碳元素燃燒反應	$C + O_2 + (N_2) = CO_2 + (N_2)$ $V_{O_2} + V_{N_2} = 1.866m^3 + 7.03m^3 = 8.89m^3$
氫元素燃燒反應	$2H_2 + O_2 + (N_2) = 2H_2O + (N_2)$ $V_{O_2} + V_{N_2} = 5.55m^3 + 20.9m^3 = 26.5m^3$
硫元素燃燒反應	$S + O_2 + (N_2) = SO_2 + (N_2)$ $V_{O_2} + V_{N_2} = 0.7m^3 + 2.63m^3 = 3.33m^3$
理論空氣用量	$V_K^0 = 8.89 \frac{C}{100} + 26.5 \frac{H}{100} + 3.33 \frac{S}{100} - 3.33 \frac{O}{100}$
實際空氣用量 (α 為過量空氣係數)	$\alpha = \frac{V_k}{V_K^0} \text{ or } V_k = \alpha V_K^0$

(2) 生質能熱水鍋爐設計-煙氣排放量

表 11 煙氣排放量計算式[29]

煙氣中三原子體積	$V_{RO_2} = 0.01886(C + 0.375S)$
煙氣中水蒸氣體積	$V_{H_2O}^0 = 0.111H + 0.0124M + 0.0161V_K^0$
煙氣中氮氣體積	$V_{N_2}^0 = 0.008N + 0.79V_K^0$
理論煙氣量	$V_Y^0 = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O}^0 + V_{N_2}^0 = V_{RO_2} + V_{H_2O}^0 + V_{N_2}^0$ $V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}$
實際煙氣量	$V_Y = V_Y^0 + 0.21(\alpha - 1)V_K^0 + 0.79(\alpha - 1)V_K^0 + 0.0161(\alpha - 1)V_K^0$

(3) 生質能鍋爐設計-鍋爐效率

表 12 煙氣焓與鍋爐效率計算式[29]

理論煙氣焓	$h_y^0 = V_{RO_2}(c\theta)_{CO_2} + V_{N_2}^0(c\theta)_{N_2} + V_{H_2O}^0(c\theta)_{H_2O}$
理論空氣焓	$h_k^0 = V_K^0(c\theta)_k$

飛灰焓	$h_{fh} = \alpha_{fh} \frac{A}{100} (c\theta)_{fh}$
實際煙氣焓	$h_y = h_y^0 + (\alpha - 1)h_k^0 + h_{fh}$
排煙熱損失比例	$q_2 = \frac{Q_2}{Q_r} = \left(\frac{h_y - \alpha \times h_k^0}{Q_r} \times \left(1 - \frac{q_4}{100} \right) \right) \times 100\%$
氣體未完全燃燒損失比例	$q_3 = \frac{Q_3}{Q_r} \times 100\%$
固體未完全燃燒損失比例	$q_4 = \frac{Q_4}{Q_r} \times 100\%$
散熱損失比例	$q_5 = \frac{Q_5}{Q_r} \times 100\%$
灰渣物理熱損失比例	$q_6 = \frac{Q_6}{Q_r} = \left(\frac{\alpha_e \times (c\theta)_{fh} \times A}{Q_r} \right) \times 100\%$
鍋爐熱效率	$\eta = 100 - \sum_{n=1}^6 q_n$
鍋爐熱平衡	$Q_1 = Q_r - (Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6)$
鍋爐輸入熱量	$Q_r = Q_{net} + h_r + Q_{wr} + Q_{wh}$

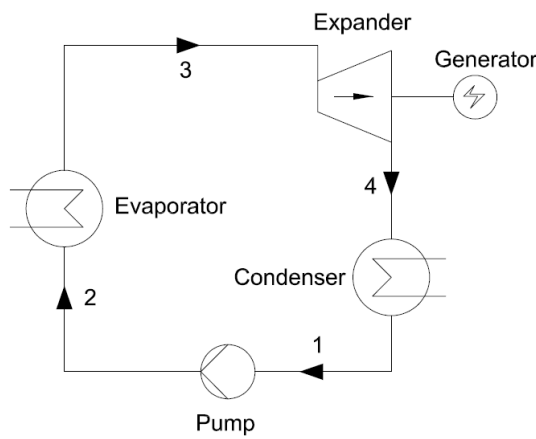
本作品為確保生質能熱水鍋爐之熱力模型具可靠度，因此將鍋爐模型進行文獻比對驗證，比對結果如下表 13 所示。

表 13 生質能熱水鍋爐模型驗證

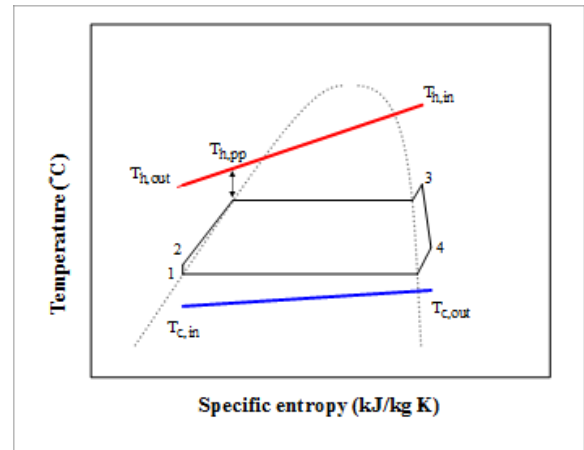
Ref.	Air rate (kg/s)	本作品流量 (kg/s)	Error (%)
Gómez et al.[30]	0.0142	0.0136	4.34
Ramos et al.[28]	23.06	22.76	1.30
Collazo et al.[31]	47.95	45.89	4.30

4. 有機朗肯循環系統(organic Rankine cycle, ORC)

經由乾燥機乾燥的 SMS，提供生質能熱水鍋爐進行燃燒，鍋爐效率依照表 12 進行計算，會獲得該鍋爐提供的有效熱量，本作品使用有機朗肯循環(organic Rankine cycle, ORC)作為熱電轉換系統，並結合迴轉式乾燥機與生質能熱水鍋爐，進行熱力系統分析，評估本作品的可行性。其中 ORC 系統由泵浦(Pump)、蒸發器(Evaporator)、膨脹器(Expander)及冷凝器(Condenser)四大部件組成，如圖 15(a)所示，運作原理為工作流體由點1至點2經由泵浦加壓送至蒸發器與熱源0進行熱交換(點2至點3)，而工作流體吸熱後進行相態變化成高壓蒸氣，進入膨脹器後降溫降壓(點3至點4)，管路內的高溫高壓蒸氣會使膨脹器做功帶動發電機發電，由膨脹器出口之工作流體與冷凝器進行熱交換(點4至點1)，釋放熱能使工作流體液態，最終送回泵浦完成熱力循環，圖 15(b)為相對應 ORC 系統之溫熵(T-s)圖。



(a)



(b)

圖 15 (a) ORC 系統示意圖與(b)溫熵(T-s)圖

根據表 12計算出生質能熱水鍋爐效率，提供 ORC 熱電系統發電之熱量，本作品以固定鍋爐熱水流量及溫度，進行 ORC 熱電系統的設計，系統所使用的流體性質則參照 NIST REFPROP 9.0[32]流體資料庫，表 14為 ORC 熱力系統分析模型。

(1) 有機朗肯循環-熱力模型

表 14 有機朗肯循環(ORC)之熱力模型

泵浦軸功與耗電量[33]	$W_{p,elec} = \frac{W_p}{\eta_{gen}} = \frac{\dot{m}_{wf} \times (h_{p,out} - h_{p,in})}{\eta_{gen}}$
蒸發器熱交換量[34]	$Q_{eva} = \dot{m}_{wf}(h_{eva,out} - h_{eva,in})$
系統發電量[35]	$W_{exp} = \dot{m}_{wf}(h_{exp,in} - h_{exp,out}) = \frac{W_{elec}}{\eta_{gen}}$
系統淨輸出功及效率[35]	$W_{net} = W_{exp} - W_p$ $\eta_{net} = \frac{W_{net}}{Q_{eva}}$

本作品為確保有機朗肯循環之熱力模型具可靠度，因此將該模型進行文獻比對驗證，如下表 15 所示。

表 15 有機朗肯循環模型驗證[36]

η_{ORC} (%)	本作品發電效率(%)	Error (%)
14.90	14.93	0.2
16.66	16.53	-0.7

(三)作品模擬數據

若生質能發電系統的處理量能為每小時處理22,831公斤的濕 SMS(假設初始濕度為75%)，本作品平均10台運行設備進行設計，因此每台設備以每小時乾燥2,283.1公斤來進行計算。計算使用的模型如圖 7所示。

1. 乾燥 SMS 消耗的熱量

SMS 脫水後會先使用 ORC 系統的冷凝器廢熱進行第一次預乾燥，接著再使用鍋爐煙氣完成二次乾燥，表 16及表 17呈現一次與二次迴轉式乾燥機的設計條件與效率，其中包含乾燥機進出口的空气溫度、含水量、焓值以及物料的含水量變化，計算結果皆來自本作品的生質能發電模型，第一次預乾燥與二次乾燥的差異在蒸發水分的多寡及熱空氣溫度，本作品係利用 ORC 冷凝廢熱先移除 SMS 的 50%含水量(亦指 SMS 濕度從75%降低至25%)，剩餘的再利用二次乾燥機(來自煙氣的熱量)進行最後乾燥(SMS 濕度從25%降低至5%)。

表 16 一次預乾燥機計算結果

入口物料狀態		入口空氣狀態		出口物料狀態		出口空氣狀態	
SMS處理量 (kg/h)	2283.1	空氣溫度 (°C)	82	預乾燥SMS (kg/h)	738.650	空氣溫度 (°C)	47
SMS濕度 (%)	75	空氣含水量 (kg/kg)	0.0212	SMS濕度 (%)	25	空氣含水量 (kg/kg)	0.0334
SMS溫度 (°C)	25	空氣熱焓值 (kJ/kg)	138.713	SMS溫度 (°C)	40	空氣熱焓值 (kJ/kg)	134.1336
乾燥風量(kg/h)		乾燥耗能(kW)		冷凝器廢熱量(kW)		預乾燥效率(%)	
132271.2		1220.8		1852.152		65.910	

表 17 二次乾燥機計算結果

入口物料狀態		入口空氣狀態		出口物料狀態		出口空氣狀態	
SMS處理量 (kg/h)	738.650	空氣溫度 (°C)	112	預乾燥SMS (kg/h)	583.1446	空氣溫度 (°C)	52.0
SMS濕度 (%)	25	空氣含水量 (kg/kg)	0.0212	SMS濕度 (%)	5	空氣含水量 (kg/kg)	0.0397
SMS溫度 (°C)	40	空氣熱焓值 (kJ/kg)	157.508	SMS溫度 (°C)	100	空氣熱焓值 (kJ/kg)	155.354
乾燥風量(kg/h)		乾燥耗能(kW)		煙氣廢熱量(kW)		預乾燥效率(%)	
8213.088		150.05		195.00		76.90	

2. 引風機耗功

本作品根據乾燥機所需要風量進行引風機的選型設計，挑選引風機後會依照風量及壓力計算所需

的馬力，最後換算成千瓦(kW)，利於後續計算整體生質能發電系統的熱效率，引風機效率皆設計為60%，表 18為引風機之設計參數。

表 18 第一次與二次乾燥之引風機耗功計算

一次乾燥風機		二次乾燥風機	
風量 (kg/h)	132271.2	風量 (kg/h)	8213.088
CFM (ft ³ /min)	63524	CFM (ft ³ /min)	3944
hp	66.50	hp	4.129
kW	49.616	kW	3.080

3. 生質能熱水鍋爐效率

乾燥後的燃料會提供鍋爐進行燃燒，燃燒時所需的空氣用量及排放煙氣量會與 SMS 的元素比例相呼應，參照乾燥機乾燥後的 SMS 進行鍋爐設計及計算，如表 19所示，為了縮減鍋爐實際運行狀況及理想設計值的誤差，因此本作品設計鍋爐時將燃燒時產生的熱損失列入考量，從下表可看出鍋爐整體效率約79.77%。

表 19 鍋爐燃燒模型及效率計算

燃料條件		燃燒空氣量		煙氣排放量			煙氣焓	
碳元素 (%)	49.50	理論空氣用量 (m³/kg) 4.4695		理論煙氣排放量 (m³/kg) 5.2245			理論煙氣焓(kJ/kg) 1336.5	
氫元素 (%)	5.90							
氧元素 (%)	44.90	實際空氣用量 (m³/kg) 5.4752		實際煙氣排放量 (m³/kg) 6.2663			實際煙氣焓 (kJ/kg) 1390.3	
氮元素 (%)	0.09							
硫元素 (%)	0.02	鍋爐熱損失						
含水量(%)	5							
灰份(%)	0.6	有效熱量	排煙損失	氣體損失	固體損失	散熱損失	灰渣損失	鍋爐效率
LHV(kJ/kg)	16100	2080 kW	195 kW	26 kW	260 kW	44 kW	0.46 kW	79.77%

4. 有機朗肯循環系統性能分析

延續生質能熱水鍋爐所提供的有效熱量，作為 ORC 發電系統的來源，本作品會依照常見的 ORC 設計相關部件參數，如工質泵與膨脹機的等熵效率及發電機效率。本作品提高 ORC 冷凝器出口溫度，雖然會降低 ORC 系統效率，但是能夠使冷凝器中之廢熱供乾燥使用。下表 20為本作品 ORC 之計算結果。

表 20 ORC 熱電系統之設計條件與性能計算

鍋爐熱水出口溫度 (°C)	200	熱水質量流率 (kg/s)	13
冷空氣入口溫度 (°C)	32	工質泵等熵效率 (%)	0.65
冷空氣出口溫度 (°C)	82	膨脹機等熵效率 (%)	0.8
蒸發溫度 (°C)	180	ORC系統電效率 (%)	10.95
蒸發器夾點溫度 (°C)	5	系統淨輸出功 (kW)	227.76
冷凝器夾點溫度 (°C)	20	系統取熱量 (kW)	2080

5. 生質能發電系統熱效率

本作品將潮濕的 SMS 進行乾燥、燃燒並產生電力，若以本作品的創新二次廢熱乾燥發電技術分析結果來看，整體熱效率為59.28%(熱能為1545.92 kW)，而剩餘的40.72%(熱能為1061.97kW)損失，其中損失係因鍋爐效率(12.76%)、引風機耗功(2.02%)及乾燥後的排氣(24.22%及1.72%)所造成。而59.28%

熱效率則包含了 ORC 發電系統之電力(8.93%)及乾燥的熱量(44.6%及5.75%)，而本作品之創新方法可回收1370.85kW 廢熱並用於乾燥，詳細結果如圖 16 所示。

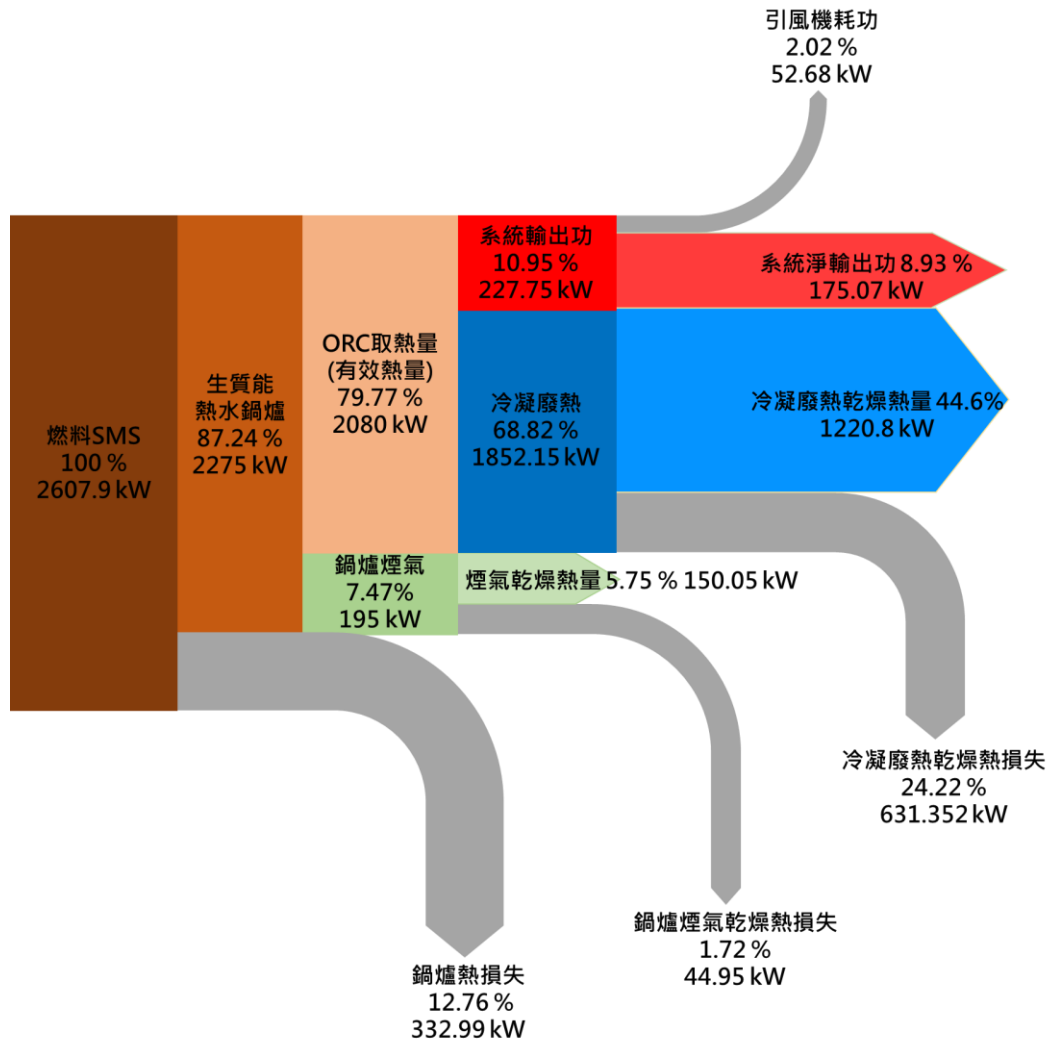


圖 16 生質能系統燃料能量轉換之能量流動(Energy flow)

三、 創意特點及說明

(一)SMS 作為燃料的優勢

根據我國2019法規「再生能源條例」第三條第二款之生質能定義為「農林植物、沼氣及國內有機廢棄物直接利用或經處理所產生之能源」[37]，燃燒乾燥後的 SMS 所產生的電力也屬於再生能源，亦是綠電，雖然國內學者透過改良廢棄 SMS 的基質製成肥料及貓砂等，創造廢棄物價值，但是遠不及廢棄物的產生速度，SMS 內含的木質素纖維是結構緻密的聚合物，難以被微生物高效降解，因此廢棄物中的木質纖維素需經過預處理才能進行發酵，因此本作品透過燃燒發電的構想，能夠解決廢棄物隨意置放及隨意焚燒的問題，還能夠創造綠色經濟使再生能源的量能提高，減少廢棄物對於環境的破壞。但生質能仍然有缺點，為了減少化石燃料的使用，有些國家會使用糧食作物製成生質酒精及柴油，地球需在僅剩不到22%的肥沃土地進行糧食與生質能的供應是相當大的挑戰[38]，本作品則利用廢棄物製成生質燃料並燃燒發電，經過評估確實能夠帶來量能及發展潛力。

雖然 SMS 的成分是較為單純的木屑，但是水分含量極高並不是非常好的生質燃料，從圖 17也可以發現當水分越高時熱值越低，濕度較高不利於直接燃燒，必須使用乾燥設備將 SMS 的水分降低，但乾燥是非常耗能的程序，故本作品針對上述問題開發可以兼顧乾燥 SMS 及燃燒發電之生質能發電系統，創造廢棄物的價值，打造循環經濟與資源創生的技術。為了比較乾燥及未乾燥直接燃燒的差異，

其中假設潮濕的 SMS 可以點火燃燒(僅計算熱值換算的能量)。計算結果如圖 18所示，結果顯示乾燥後 SMS 的發電量高於未乾燥燃燒發電量37.47%。

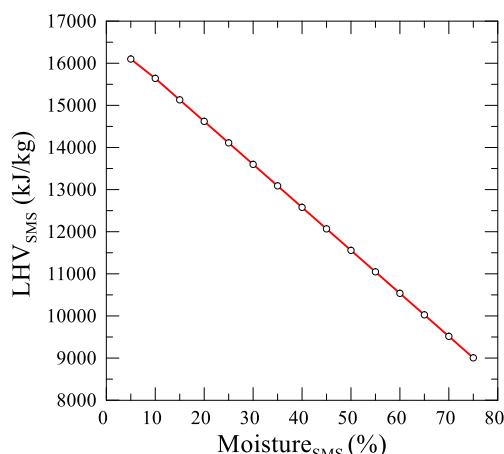
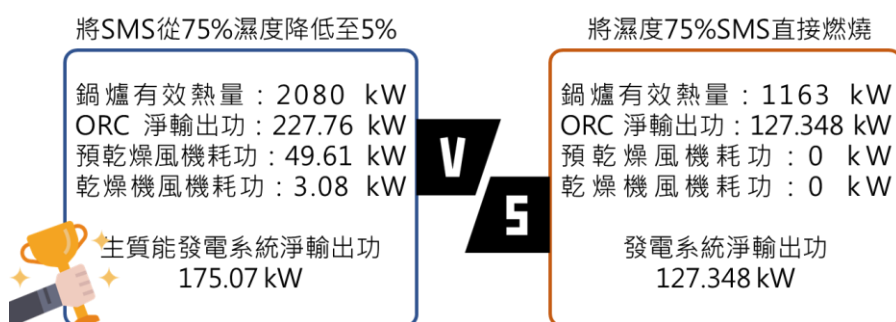


圖 17 SMS 熱值與濕度的關係圖



$$\text{淨輸出功效益比較} = \frac{175.07 - 127.348}{127.348} \times 100\% = 37.47\%$$

圖 18 比較乾燥與未乾燥燃燒發電之差異

(二)創新方法的具體效益

從圖 5可發現若用電力乾燥 SMS 將會造成入不敷出窘境(使用乾燥之電能遠超過發電量)，因此本作品進行兩種不同創新方法配置進行效益比較，如圖 19所示，其中方法一是單獨使用 ORC 冷凝器廢熱乾燥 SMS(只有一次乾燥)與方法二 ORC 冷凝器廢熱搭配鍋爐煙氣進行二次乾燥。根據計算及分析結果得知，方法一可以使系統熱效率提升至57.43%，而方法二讓熱效率可上升至59.28%。再比較圖 5可發現，本創新方法係利用系統產生的廢熱進行 SMS 之乾燥，可大幅減少乾燥所需之熱能，並將整體熱效率提高將近60%。

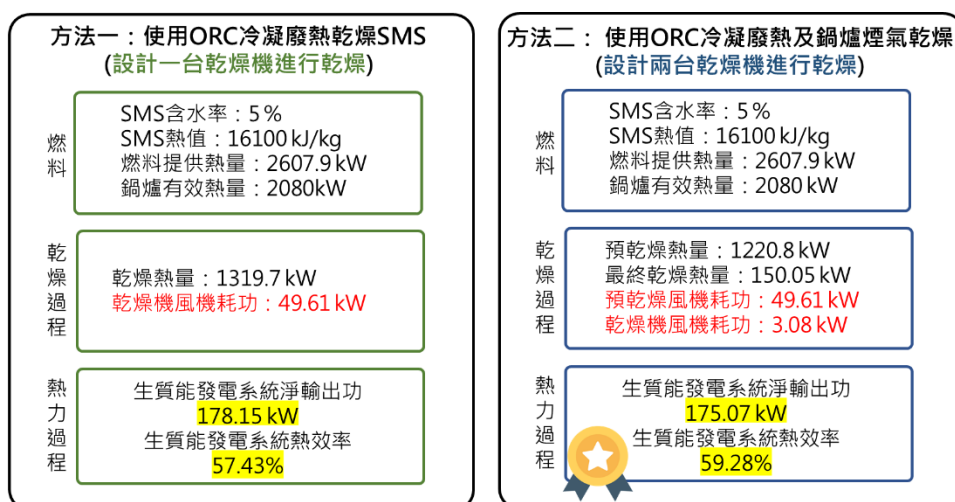


圖 19 兩種廢熱回收方式之效率計算

從圖 5可看出光是乾燥 SMS 就要消耗2184.8kW(實際用於乾燥為1388.2 kW)的熱能，若用電力進行乾燥，所產生的電力根本不敷乾燥使用，因此本作品提出利用 ORC 系統產生的廢熱及鍋爐排放煙氣的廢熱進行 SMS 乾燥，以下將針對單獨使用 ORC 冷凝廢熱乾燥及混合式(二次)乾燥進行討論：

- ✓ **創新方法一**：單獨使用 ORC 冷凝廢熱乾燥 SMS，只設計一台乾燥機，是本作品的創新方法之一，能夠有效提升生質能發電系統的熱效率至57.43%。
- ✓ **創新方法二**：將 ORC 系統的冷凝溫度從52°C增加至82°C，並使用鍋爐煙氣用於二次乾燥，即使煙氣的能量密度很低，但仍可將效率從57.43%提升至59.28%，為此需設計兩台乾燥機，雖然增加建置成本，但從永續經營及再生能源的觀點，相較於化石燃料，生質能取之不盡用之不竭，有效的提升系統熱效率才是再生能源的精髓。

(三)ORC 冷凝廢熱的應用

先前章節提及 ORC 的熱電系統效率通常都比較低，因此在國外 ORC 大廠設計 ORC 設備時都會降低工作流體的冷凝溫度(降低冷凝器出口溫度)，如表 21所示。本作品的創意特色就是提高冷凝溫度(增加冷凝器出口溫度)，雖然會使 ORC 發電系統的效率下降，但是生質能發電系統的熱效率卻有上升的趨勢，從得知當冷凝器出口溫度從52°C增加至82°C時，ORC 系統電效率從14.27%下降至10.91%，如圖 20所示，但熱效率可提升至59.28%。本作品雖然犧牲發電系統部件的效率，但是有效利用廢熱轉換成乾燥機所需的能量，使整體生質能發電系統的熱效率提升，創造廢棄物再生的價值。

表 21 國外大廠常用的 ORC 設計條件

Manufacturer	Expander Type	Heat Source Temperature (°C)	Power output (kW)	Working fluid	Electrical efficiency (%)	Cooling Source temperature inlet / outlet(°C)	Ref.
Turboden	Turbine	150-275	418	ORMT(D4)	18.2	25/35	38
Turboden	Turbine	206-305	1188	ORMT(D4)	23.6	25/35	38
Turboden	Turbine	155-285	2740	ORMT(D4)	19.5	25/48	38
Turboden	Turbine	307	1200	ORMT(D4)	23.6	25/35	39
Turboden	Turbine	>250	2200	ORMT(D4)	17-23	n.a	40

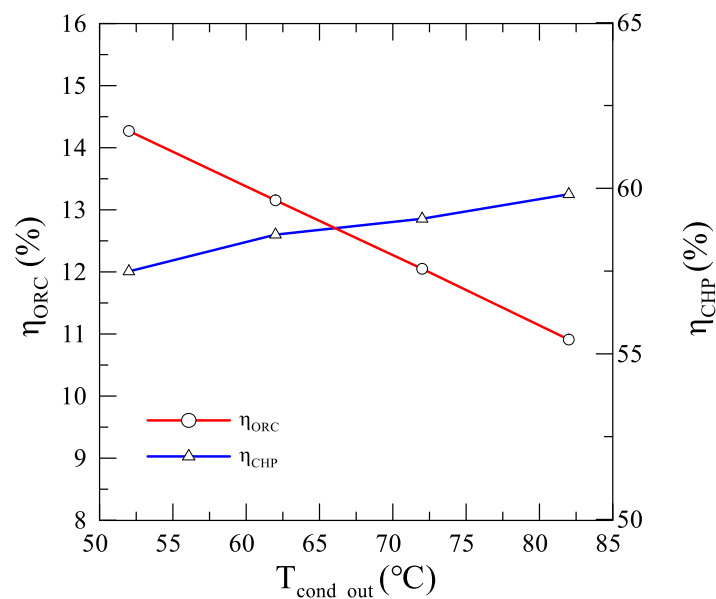
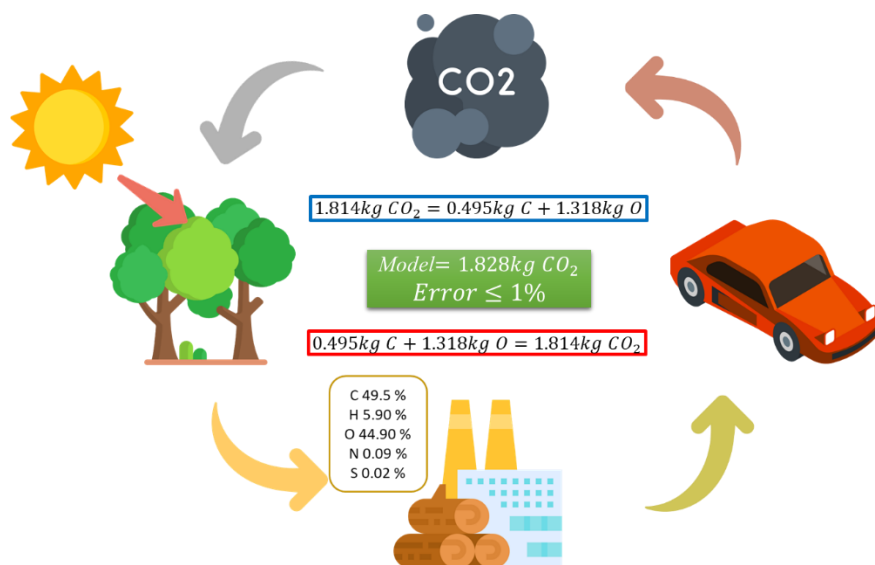


圖 20 ORC 冷凝器出口溫度對電效率及熱效率的影響

(四)碳循環

本作品使用 SMS 作為燃料，先降低水分再進行燃燒發電，與傳統的化石燃料相比，在能量轉換的過程不會增加地表上的碳含量，且在燃燒的過程，因為 SMS 的成分除了栽種香菇時會添加的菌種及幫助香菇生長的介質，其成分大多為單純的木屑。根據本作品使用的燃料元素進行化學平衡計算，每燃燒一公斤的 SMS 會產生1.814公斤的二氧化碳，植被透過光合作用會再將二氧化碳轉換成木質素的成分及氧氣，如先前說明，生質能源即使在能量轉換過程當中產生碳排，但並不會對地表環境增加額外的碳，因此碳中和也是淨零碳排的前哨戰，如圖 21所示。



本作品每燃燒一公斤的SMS會產生1.814公斤的二氧化碳
(每公斤SMS內含有45.9%的碳原子)
排放二氧化碳則由生物質成長時的固碳過程吸收

圖 21 生質燃料於地表上的碳循環

(五)資源創生及環境永續

圖 22為台灣目前的 SMS 處置方式，以往廢棄的 SMS 都會交由廢棄物處理的廠商，但是每年能夠處理的量能只有70%，且根據報導每公頃的處理費用從2003年6萬5000元上漲至2020年12萬元。菇農在栽種過程當中，產生的農業廢棄物，交給廢棄物處理商處理需要支付龐大的費用，所以為了平衡收支導致被迫隨意丟棄，因此本作品透過生質能發電廠回收 SMS，第一能夠減少廢棄物亂丟的問題；第二能夠利用廢棄 SMS 產生能量，創造廢棄物的價值；第三能夠減輕菇農負擔，有效降低處理費用。

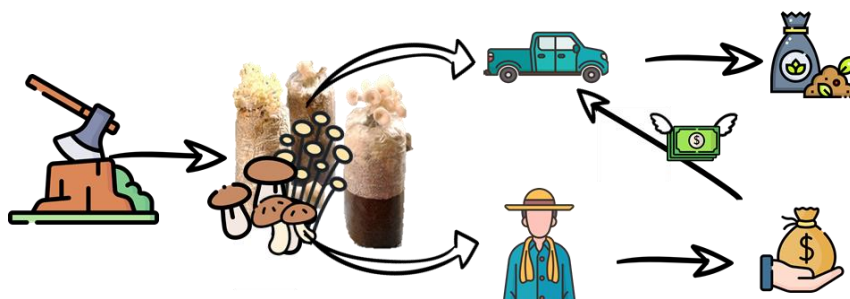


圖 22 台灣目前 SMS 的處置方法

圖 23為本創新發想的處置方式，為了降低 SMS 處理費用及解決丟棄掩埋等問題，故本作品將乾燥設備、鍋爐及有機朗肯循環等系統整合並建置於香菇產地(如台中新社)，因此處理 SMS 就不需額外的運輸費用。以往回收處理 SMS 成本高，所以菇農大多入不敷出，若能與在地菇農合作，設身處

地解決問題，分析回收業者及本企劃創意發想的差異及優劣，生質能發電系統不僅能解決 SMS 回收問題，使用生質能發電也能減緩菇類大量栽種對環境的破壞，為地球及環境盡一份心力，讓吃菇不再是一件對環境有害的事情，創造與環境及生活雙贏的方法。

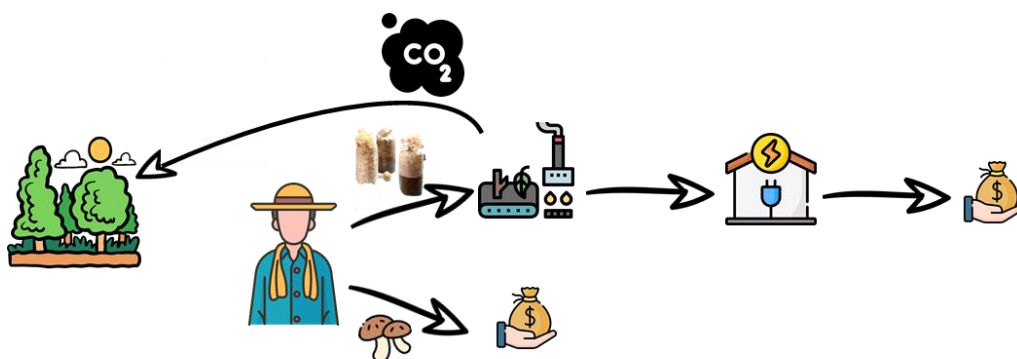


圖 23 本作品創意發想之處置方法

(六) 乾燥與燃燒過程中產生的物質

生質能發電過程當中也會產生一些廢棄物，例如 SMS 乾燥後產生的廢水以及燃燒後產生的煙氣，本作品將發電過程產生的廢棄物及煙氣比例列出，以下將針對後續處理方式進行說明，請參考圖 24：

- (1) SMS 乾燥後提供生質能電廠進行發電(站點1至站點2)，產生的廢水經由處理廠回收淨化後可提供生物質成長的元素(站點9至站點8)。
- (2) 燃燒 SMS 的過程會產生煙氣(站點2至站點7)，其煙氣成分為68.9%的氮氣、12.8%的水蒸氣、3.36%的氧氣、14.74的二氧化碳及0.2%的二氧化硫(經由鍋爐熱力模型計算，假設完全燃燒)，當中的二氧化碳及少量二氧化硫提供生物質成長所需的元素(站點7至站點8)，煙氣排放過程會經由過濾及除塵達到排放標準。
- (3) 生質能發電廠燃燒 SMS 後會產生電力，提供供電需求(站點2至站點4)，另外燃燒後會產生爐渣及灰分可透過回收添加在水泥(站點5至站點6)。

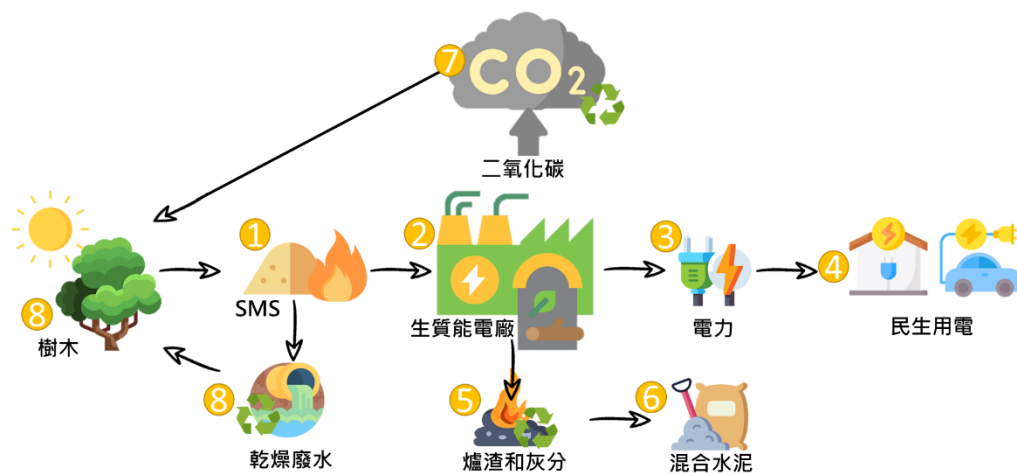


圖 24 廢棄 SMS 生質能發電之碳循環與經濟循環路徑

本作品的創新方法結合迴轉式乾燥機、引風機、生質能熱水鍋爐及有機朗肯循環，並利用廢熱提升系統熱效率，設計生質能發電電廠的條件，經過分析得知燃燒 SMS 後的電功率為1,575.63 kW，每月(720小時)發電量為1,134,453.6kWh，可供2521戶小家庭使用一個月(以夏天平均用電量計算)，運行一年每年總共可以產生約13GWh(13,802,518.8kWh)的發電量，根據台電111年度再生能源的躉購費率公告，農業廢棄物的躉購費率每度5.1407元為計算基礎，本作品之生質能系統每年能夠獲取約7095萬

的綠電費用，並減少7025噸的碳排放(以台灣電力公司每發一度電產生0.509公斤的碳排)，若將本作品生質能發電廠所需的設備及費用進行估算，報價費用為設備商官網及銷售通路取得，下表 22為本作品的建置費用估算，由上述的綠電費用計算預計4年後可回收電廠建置成本。

表 22 本作品之相關部件費用

NO	生質能發電場部件	市面上的報價	建置成本佔比
1	迴轉式乾燥機 (額定容量20萬噸每小時)	3,000萬	10.16%
2	生質能熱水鍋爐 (額定容量20MW)	5,000萬	16.94%
3	有機朗肯循環發電機組 (額定容量2MW)	5,000萬	16.94%
4	控制器 (各設備人機介面)	1,500萬	5.08%
5	冷熱源管路及感測器	2,500萬	8.47%
6	煙氣熱交換器及引風機	3,000萬	10.16%
7	運營成本 (人力、維護、售後服務)	4,000萬	13.55%
8	廢水廢氣處理	2,500萬	8.47%
9	設計開發及測試	3,000萬	10.16%
	total	2.9億	100%

永續能源及循環經濟是近年來非常熱門的議題，各國學者及專家都致力於再生能源的開發，期盼替代化石能源，讓環境汙染及破壞不再惡化，當中有許多的再生能源，如風力、水力、太陽能、生質能及地熱等等，在替代能源的開發過程一定會有阻力及必須克服的難題，且各有發展潛力及優缺點，本作品作為生質能發電預估的回收年限為4年，相較其他再生能源的回收年限較短，也具可行性及未來發展性，表 23為各式再生能源的比較圖，圖中的生質能發電回收年限需15年至25年是因為當中包含沼氣發電，建置成本及維護成本使回收年限增加，且本作品的生質燃料不需支付額外費用，故可在4年後回收。

表 23 各種再生能源的優缺點及回收年限

發電種類	優點	缺點	回收年限	資料來源
 地熱	對環境污染少 電廠壽命長	地區限制 需較高的開發技術 地質結構破壞	10-50年	[42]
 太陽能	發電過程無噪音 建設成本低	受天候影響 能量密度低 儲能問題	25-30年	[43]
 風力	系統運行穩定 建設成本低	受天候影響 能量密度低 影響野生動物(鳥)	20-25年	[44]
 水力	維護成本低 防洪 不受天候影響	高建置成本 影響環境生態 水資源限制	50-100年	[45]
 生質能	具多功能性 經濟效益高	維護成本高 燃燒汙染 燃料供應	15-25年	[46]

(七)永續發展

本作品將一年20萬噸的 SMS 進行回收燃燒發電，每年減碳量為7025噸(以台電每度電的碳排為0.509公斤)，約為18座大安森林公園一年的碳吸附量，透過本作品減少碳排，不只解決農業廢棄物的問題，減緩對於淡水資源、海洋及空氣的污染，還能夠產生電力為再生能源及地球盡一份心力，本作品也符合聯合國永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs)的細項，如下說明：

✓ **SDGs 7 可負擔的潔淨能源**

本作品回收廢棄物進行燃燒，若與政策推動及鼓勵，使分散式能源能夠有效利用，讓農民或是會產生農業廢棄物的業者也能夠過生質能發電提升廢棄物的價值

✓ **SDGs 12 責任消費及生產**

透過 SMS 的回收，使吃菇不再是一件對環境產生破壞的元兇，利用本作品提升廢棄物的生命週期，創造循環經濟，使綠色香菇的概念能夠落實及推動

✓ **SDGs 13 氣候行動**

因應氣候變遷及減少對化石燃料的依賴，本作品透過燃燒農業廢棄物產生能源，在燃燒發電的過程不產生碳排(以發電過程為框架)，未來若能與政策呼應，達到循環經濟的目標，為我們生活的這塊土地盡一份心力。

✓ **SDGs 14 保育海洋生態**

先前提及若將廢棄的 SMS 隨意排放，造成河川的汙染，最終都會流向大海，這些塑膠製品(太空包外包裝)會造成海洋破壞及生態浩劫，透過本作品可以有效控管廢棄物去處，減少對環境的危害。

✓ **SDGs 15 保育陸域生態**

先前提及若將廢棄的 SMS 隨意掩埋，造成土壤負載力降低，且隨意燃燒造成的廢棄物更會對動植物的生命及棲地造成威脅，環境的物種若縱然消失，保持平衡的生態鏈就會因此崩塌，因此本作品回收 SMS 也能夠降低對環境的破壞。

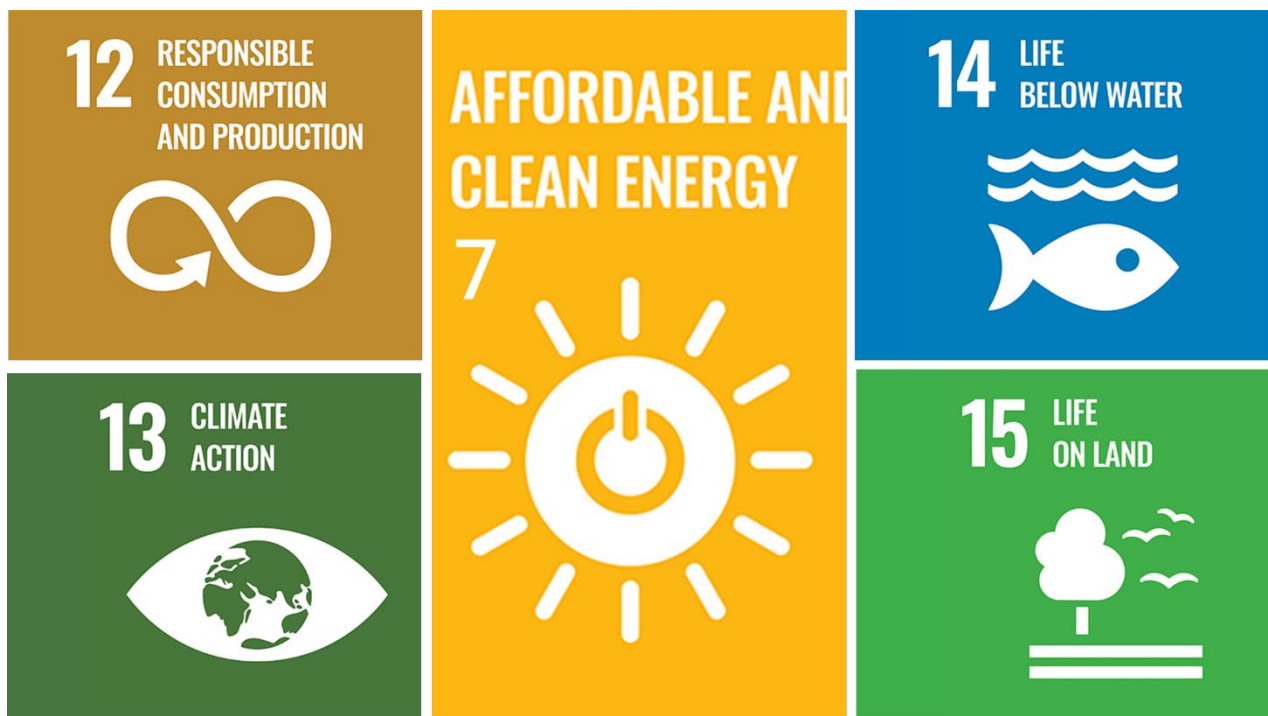


圖 25 本作品符合之 SDGs

四、作品應用場域及發展潛能

(一) 應用範圍

本作品應用生質能進行發電，應用範圍廣泛，不管水分多寡都可以進行乾燥燃燒發電，使廢棄物的價值提升，為本作品的應用範圍。

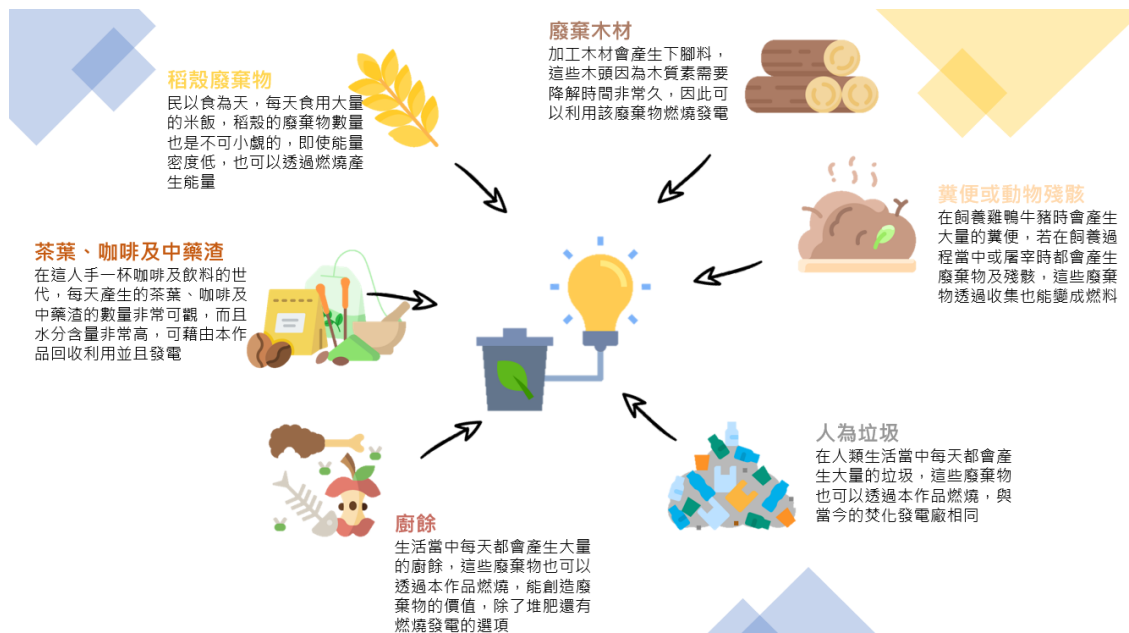


圖 26 生質能發電系統之應用範圍

(二) 發展潛能

本作品針對兩個角度進行兩種商業模式的設計，表 24 及表 25 將在本節詳細介紹。

現今回收業者商業模式：

現今回收業者主要服務客群為無法自行處理 SMS 的菇農，但處理量能僅 70%，仍有多數的 SMS 無法回收，且回收後會先置放製廠區降低水分再做其他的利用，產品的置放週期就會提升，減少處理場的處理量能，雖然回收業者可以幫助菇農處理廢棄物，但過程當中包含運費及昂貴的處理成本。

表 24 現今回收業者之商業模式

Key Partners	Key Activities	Value Propositions	Customer Relationship	Customer Segments
菇農 運輸業者 回收業者 政府	搭建平台 技術研發 Key Resources 製程技術 專利技術 經驗傳承	廢物利用 按照規範處置廢棄物 永續發展 資源創生	免費或付費處理方案 Channels 官方專頁 政府合作 網路媒體	菇農 ：全台每年生產約 20 萬噸香菇太空包。如無法自行處理廢棄物的在地菇農
Cost Structure			Revenue Streams	
行銷成本 (5%) 材料成本(太空包) (5%) 運輸成本 (10%) 人力成本 (20%)			農業廢棄物處理費用 搬運運費	
回收技術研發成本 (20%) 處理成本(30%)				

本作品的商業模式：

本作品透過回收 SMS，並且將一系列的流程建立，包含乾燥、燃燒及發電，協助這些菇農處理廢棄物，並且不加收處理費用，若菇農將廢棄物交給本作品處理，不僅能夠減少處理成本，還能夠對環境保護及維護盡一份心力，且本作品設計以台灣一年產生的 SMS 進行回收，因此在處理量能相較於目前的回收業者多出許多，使台灣也能夠創造永續環境循環經濟的未來。

表 25 本作品之商業模式

Key Partners	Key Activities	Value Propositions	Customer Relationship	Customer Segments
菇農 乾燥機製造商 鍋爐製造商 ORC發電系統製造商 其他零件供應商 控制器製造商 高壓電塔製造商 政府及國營企業	搭建平台 技術研發 解決問題 Key Resources 製程技術 專利技術 經驗傳承	廢物利用 生質能發電 減少菇農支出 提高能源利用率 生產綠電 減少碳排 永續發展	自助式服務 免費或付費處理方案 綠電販售 Channels 官方專頁 政府合作 網路媒體	菇農: 無法自行處理 香菇太空包等農業廢棄物之廠商。 公司或民生用: 需使用綠電 或個人家庭用。
Cost Structure			Revenue Streams	
行銷成本 (5%) 技術研發成本 (20%) 運輸成本 (5%) 人力成本 (10%) 系統建置成本 (60%)			農業廢棄物處理費用 搬運運費 ★ 綠電獎金 政府補助	

五、 結論

本作品結合乾燥設備、燃燒鍋爐及有機朗肯循環建立回收 SMS 的生質能發電系統來解決農業廢棄物問題，且利用冷凝廢熱及鍋爐煙氣廢熱乾燥廢棄菇包，有效提升系統熱效率且能夠減少 SMS 對於環境的衝擊，本作品主要成果總結如下：

1. 使用傳統電力方法乾燥 SMS，再進行燃燒發電不敷成本。根據理論驗證利用廢熱乾燥 SMS，乾燥後之 SMS 產電之架構符合經濟效益。
2. 本作品利用 ORC 冷凝廢熱及鍋爐煙氣進行 SMS 乾燥，有效提升生質能發電熱效率達59.28%，預估運行4年能夠回收。
3. 由於 SMS 的回收業者處理量能僅有70%，透過本作品可以解決回收問題，並減緩菇類大量栽種對於環境的破壞，利用乾燥 SMS 作為生質燃料，達到碳中和為2050淨零碳排排放路徑盡微薄之力。
4. 以台中新社每年產生20萬噸的 SMS 進行乾燥後燃燒發電，**每年減碳量為7025噸，約為18大安森林公園的年碳吸附量。**
5. 承上所述，本作品若年處理20萬噸的廢棄 SMS，**一年總共可產生13GWh(13,802,518.8kWh)的發電量，可供2521戶小家庭一年的用電量。**
6. 本作品符合聯合國永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs)當中的7、12、14及15。

六、 未來工作

本作品主要以數值模擬方式計算 SMS 乾燥後燃燒是否具可行性，透過有機朗肯循環可以有效利用熱能，提供乾燥 SMS 的能量，礙於時間及經費只能分析性能與經濟性，本作品還有些參數可最佳化，因此未來仍可進行的工作項目如下：

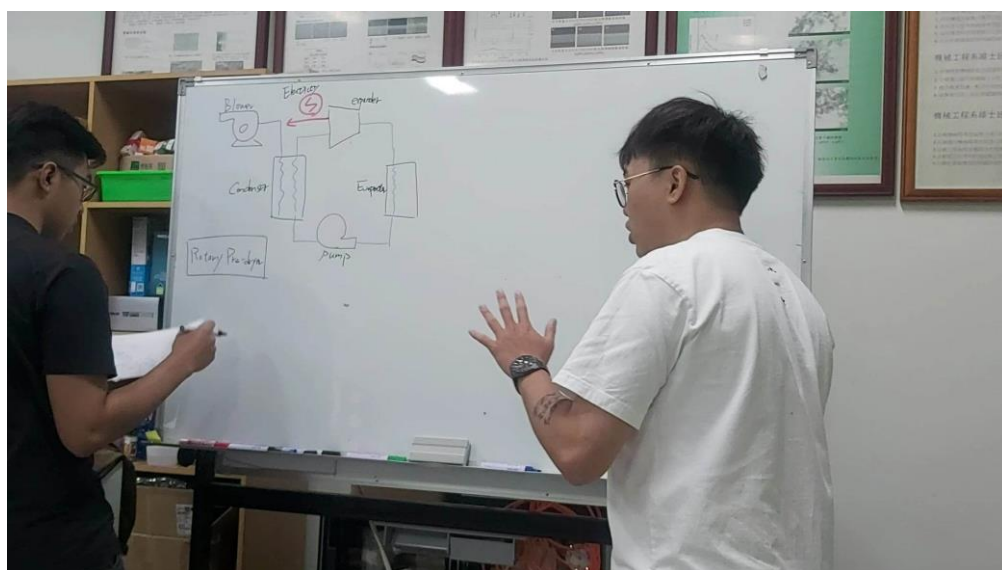
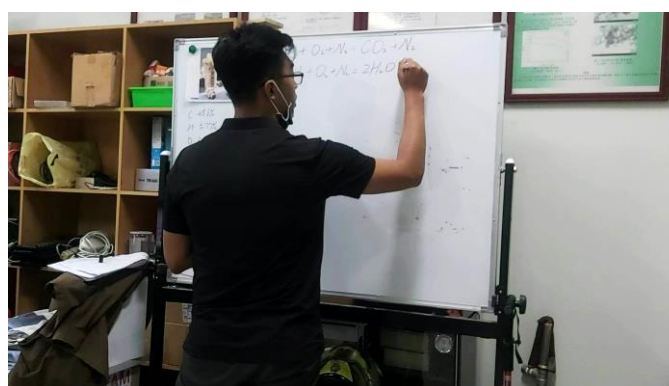
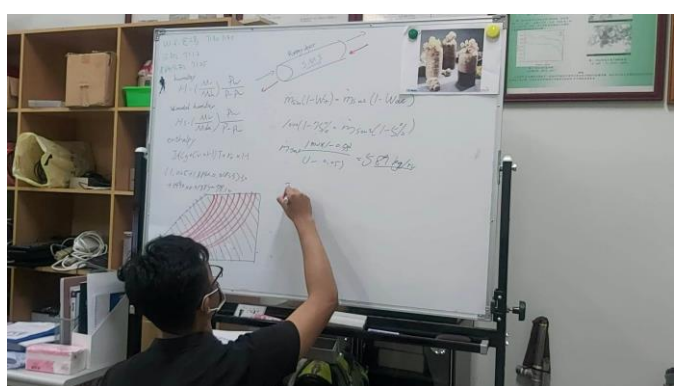
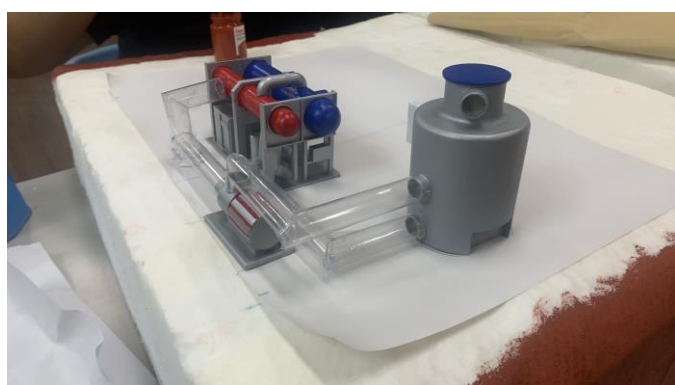
1. 本作品已完成生質能發電廠的數值模型，並克服生質能水分過多不利於利用及燃燒等問題，透過迴轉式乾燥機可降低水分，未來可應用不同的農業或事業廢棄物，如茶葉渣、咖啡渣及中藥渣等。
2. 於有機朗肯循環當中使用的工作流體，未來可以換不同的環保冷媒並符合本作品的操作條件。

3. 碳足跡的盤查及分析需要長久的資料收集及歸納，本作品僅計算減碳效益，未來可經資料庫細算碳的路徑。
4. 生質能發電的文獻當中，若使用鍋爐設備，對於煙氣成分大多以濃度表示，如何脫硫及脫氮的細節都較少闡述，未來計算將可包含煙氣處理的過程。

七、 工作分配

組員姓名	工作事項
廖朕浩	設計發想、數值計算、作品書撰寫、影片製作
謝易騏	設計發想、實體模型製作、資料收集、分析數據、製圖
張介謀	設計發想、實體模型製作、資料彙整、海報製作

八、作品設計及討論花絮



九、參考文獻

1. 台灣菇類產業生產現況，台灣菇類發展協會，農業試驗所病理組。
2. 台灣農業故事館，農業專題，太空包栽培後介質再利用。
3. 香菇太空包掉新社大排綿延4公里，自由時報，2017/07/26蔡淑媛報導。
4. 許育銘 (2018)。廢棄菇包製作生質燃料之可行性研究。
5. 豐年201912月號-太空包多元應用，完生廢棄物二次汙染
6. 台灣電力公司資訊圖表。
7. Adeleke, A. A., Ikubanni, P. P., Orhadahwe, T. A., Christopher, C. T., Akano, J. M., Agboola, O. O., ... & Ibikunle, R. A. (2021). Sustainability of multifaceted usage of biomass: A review. *Heliyon*, 7(9), e08025.
8. Luk, H. T., Lam, T. Y. G., Oyedun, A. O., Gebreegziabher, T., & Hui, C. W. (2013). Drying of biomass for power generation: A case study on power generation from empty fruit bunch. *Energy*, 63, 205-215.
9. Yuan, R., Yu, S., & Shen, Y. (2019). Pyrolysis and combustion kinetics of lignocellulosic biomass pellets with calcium-rich wastes from agro-forestry residues. *Waste Management*, 87, 86-96.
10. Tartière, T., & Astolfi, M. (2017). A world overview of the organic Rankine cycle market. *Energy Procedia*, 129, 2-9.
11. Ince, P. J. (1977). Estimating effective heating value of wood or bark fuels at various moisture contents (Vol. 13). Forest Products Laboratory.
12. Perazzini, H., Perazzini, M. T., Freire, F. B., Freire, F. B., & Freire, J. T. (2021). Modeling and cost analysis of drying of citrus residues as biomass in rotary dryer for bioenergy. *Renewable Energy*, 175, 167-178.
13. Novak L, Gatarić P, Širok B. Influence of drum inlet air conditions on drying process in a domestic tumble dryer. *Dry Technol* 2019;37:781-92.
14. Devres YO. Psychrometric properties of humid air: calculation procedures. *Appl Energ* 1994;48:1-18.
15. Goodfellow HD, Tahti E. Industrial ventilation design guidebook. Academic press. 2001
16. Handbook, A. S. H. R. A. E. (2013). Fundamentals-2013 American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta.
17. Kalbasi R, Ruhani B, Rostami S. Energetic analysis of an air handling unit combined with enthalpy air-to-air heat exchanger. *J Therm Anal Calorim* 2020;139:2881-90.
18. Bacelos MS, Jesus CDF, Freire JT. Modeling and drying of carton packaging waste in a rotary dryer. *Dry Technol* 2009;27:927-37
19. 王子宗。石油化工設計手冊。2015。化學工業出版社
20. Mujumdar, A. S. (2006). Handbook of industrial drying. CRC press.
21. ECHEERI, A., & MAALMI, M. (2021). Performance evaluation of a rotary dryer in both co-current and counter-current configurations. *Journal of Thermal Engineering*, 7(Supp 14), 1945-1957.
22. Bacelos, M. S., Jesus, C. D. F., & Freire, J. T. (2009). Modeling and drying of carton packaging waste in a rotary dryer. *Drying Technology*, 27(9), 927-937.
23. Kamke, F. A., & Wilson, J. B. (1986). Computer simulation of a rotary dryer. Part II: Heat and mass

- transfer. *AIChE Journal*, 32(2), 269-275.
24. 熱工基礎，北京：中國建材工業出版社，2005。
25. 寶麗電子股份有限公司，風扇特性曲線 P-Q 中靜壓的秘密。
26. Leong, Y. K., Ma, T. W., Chang, J. S., & Yang, F. C. (2022). Recent advances and future directions on the valorization of spent mushroom substrate (SMS): A review. *Bioresource technology*, 344, 126157.
27. Qian, H., Guo, X., Fan, S., Hagos, K., Lu, X., Liu, C., & Huang, D. (2016). A simple prediction model for higher heat value of biomass. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 61(12), 4039-4045.
28. Ramos, V. F., Pinheiro, O. S., da Costa Jr, E. F., & da Costa, A. O. S. (2019). A method for exergetic analysis of a real kraft biomass boiler. *Energy*, 183, 946-957.
29. 工業鍋爐設計，北京：機械工業出版社，2005。
30. Gómez, M. A., Comesaña, R., Feijoo, M. A. Á., & Eguía, P. (2012). Simulation of the effect of water temperature on domestic biomass boiler performance. *Energies*, 5(4), 1044-1061.
31. Collazo, J., Porteiro, J., Míguez, J. L., Granada, E., & Gómez, M. A. (2012). Numerical simulation of a small-scale biomass boiler. *Energy Conversion and Management*, 64, 87-96.
32. Lemmon, E. W., Huber, M. L., & McLinden, M. O. (2002). NIST reference fluid thermodynamic and transport properties—REFPROP. NIST standard reference database, 23, v7.
33. Lei M, Ma X, Lian Q, Meng X, Wu T, Wei X. Experimental investigation on the characteristics of heat exchangers based on organic Rankine cycle system under different operating conditions. *Int J Energy Res* 2021;45(9):13365-79.
34. Li YM, Hung TC, Wu CJ, Su TY, Xi H, Wang CC. Experimental investigation of 3-kW organic Rankine cycle (ORC) system subject to heat source conditions: A new appraisal for assessment. *Energy* 2021;217:119342.
35. Kheiri A, Feidt M, Pelloux-Prayer S. Thermodynamic and economic optimizations of a waste heat to power plant driven by a subcritical ORC (Organic Rankine Cycle) using pure or zeotropic working fluid. *Energy* 2014;78:622-38.
36. Liu, H., Shao, Y., & Li, J. (2011). A biomass-fired micro-scale CHP system with organic Rankine cycle (ORC)—Thermodynamic modelling studies. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3985-3994.
37. 中華民國經濟部能源局。
38. Popp, J., Kovács, S., Oláh, J., Divéki, Z., & Balázs, E. (2021). Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy supply and demand. *New Biotechnology*, 60, 76-84.
39. Tchanche BF, Pétrissans M, Papadakis G. Heat resources and organic Rankine cycle machines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014;39: 1185-99.
40. Forni D, Campana F, Santo DD. Innovative system for electricity generation from waste heat recovery. *ECEEE Industrial Summer Study Proceedings*, 2014;393e403.
41. Vélez F, Segovia JJ, Martín MC, Antolín G, Chejne F, Quijano A. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012;16:4175-89.
42. 《地熱發電技術》(ISBN：9787122225995)
43. 美國太陽能產業協會(<https://www.seia.org/solar-industry-research-data>)
44. 歐洲風能協會(<https://windeurope.org/about-wind/reducing-costs/lifetime/>)

45. 《水電站經營與管理》(ISBN：9787030442497)
46. 《生物質能源發電技術》(ISBN：9787518616575)