

國家科學及技術委員會補助
大專學生研究計畫研究成果報告

計 畫
名 稱 : 3D列印再生線材對製造環境與人體健康衝擊的優化分析

報 告 類 別 : 成果報告
執行計畫學生 : 施驊宸
學生計畫編號 : NSTC 111-2813-C-110-063-M
研 究 期 間 : 111年07月01日至112年02月28日止，計8個月
指 導 教 授 : 楊政融

處 理 方 式 : 本計畫可公開查詢

執 行 單 位 : 國立中山大學人文暨科技跨領域學士學位學程

中 華 民 國 112年03月26日

一、摘要

熔融沉積成型 (Fused deposition modeling, FDM) 是常用的 3D 列印技術之一。FDM 技術可以簡單且快速的製出成品，因此被許多小型工廠、自造者、甚至是家庭所採用。已經有許多研究指出此類型機器使用的塑膠線材在製造過程中會對環境和健康造成影響，特別是懸浮微粒與揮發性有機化合物可能造成人體危害。然而，這些研究僅止於討論原始線材 (一次線材)，尚無關於回收再生線材 (二次線材) 的研究。對於現在強調再生塑膠以達成循環經濟的方向來說，再生材料能否真正達到永續有其探究的必要性。本研究使用田口方法分別規劃原始和再生線材實驗，並透過灰色關聯分析法進行多目標最佳化分析，理解線材在此轉變下，在製造過程對環境的真實衝擊。由實驗結果得知，無論是最佳組別或最佳參數組合，(1) 再生線材在環境與健康上均擁有最好的表現、(2) 在生命週期評估中，再生線材也都具有最好的碳排放表現。

關鍵詞：熔融沉積成型、再生線材、灰色關聯分析、生命週期評估

二、研究動機與研究問題

熔融沉積成型為近年熱門的積層製造 (Additive Manufacturing, AM) 技術，透過加熱線材 (如：PLA、ABS、PC 或尼龍) 至一定溫度使材料熔化，電腦再依據列印檔案內的代碼控制步進馬達，將擠出機移動到列印位置，經過層層堆疊後即可製造完成，具有低成本、易操作、產品不需特殊加工處理、設備維護容易等特點，成為自造者們首選的製造工具。雖然積層製造相對於減法製造已經減少許多原材料上的浪費，且 PLA 為一種可降解的聚合物塑料，由玉米澱粉或甘蔗等植物性資源製成，經研究證實 PLA 在環境污染或對人體的危害均比 ABS 減少許多，但不可避免的是，在採用 FDM 製程時，仍會因為列印物件的需要，而有廢棄材料產生的情形，包括：印製前的噴頭清潔、更換線材、支撐材、印製失敗的成品和過短的線材等，都會因為無法利用而必須丟棄，這些都會造成材料上的浪費；此外，針對小型用戶 (如：小型企業或工廠、自造者、家庭等) 列印機所放置的環境可能較為密閉或通風不佳的情況下，3D 列印過程中所產生的有害物質 (包含：懸浮微粒與揮發性有機物等) 會被人體所吸入，長期下來更可能影響人體健康。

在全球環保意識抬頭下，循環經濟 (Circular economy) 成為製造業的技術創新方向，尤其 2050 淨零排放政策實施後，許多企業不得不開始重視環境議題、並採取相關行動。在 3D 列印方面，透過回收 PLA 塑膠並將其再製成線材，可讓廢棄塑膠重新再利用、減少原始資源開採，又能同時達成降低環境衝擊和產品開發的雙贏局面。在過往的研究中，發現原始線材在製造過程對於能源消耗與環境衝擊均有顯著影響，且機器列印參數的變化攸關著衝擊量的多寡。就實際情況而言，使用再生材料仍存有前段敘述之議題，但與一次材相比結果又是如何？特別在人體健康與能源消耗帶來的碳排放表現是否會有變化，將會是本研究欲探討的問題。

本研究將針對機器在列印過程所產生的兩大環境議題進行研究，包括：(1) 對人體產生健康方面的影響，共有懸浮微粒 (Particulate Matter, PM) 與揮發性有機化合物 (Volatile Organic Compounds, VOCs)；(2) 生產耗能所衍伸對於大氣的碳排放量。會影響這兩項議題數據多寡的機器列印參數包括：熱床溫度、風扇溫度、擠出溫度、列印速度、填充率、填充圖案、線材顏色、層厚、殼層數、擺放

角度，後續也會詳細說明選擇探討這些參數的原因。此外，本研究也將分析實驗所量測到的數據，針對機器列印參數（自變數）與兩大議題（應變數），透過灰色關聯分析（Grey Relational Analysis, GRA）找出影響兩大議題較為顯著的列印參數，以及多目標下的最佳化結果，並分析原始線材與再生線材兩者在人體健康與碳排放的表現及差異。

過去在評估一個產品對環境造成的影響時，通常只會計算該產品在製造過程所產生的碳足跡，而未深入探究從原料取得、製造，到產品生產、運送、消費者使用、產品回收等一整段使用過程所產生的碳排放；有鑒於此，國際標準化組織於 2006 年發布生命週期評估(Life cycle assessment, LCA)系列標準(ISO 14040)^[1]，並提出生命週期評估的框架（如下圖 1 所示），以盤查一產品從搖籃到墳墓（Cradle to Grave）整個過程對環境造成的影響，是一種較為詳盡、更周全、有系統可遵循的環境評估方式。因此，本研究也嘗試透過生命週期評估計算各組從原料（PLA 塑膠）到成品列印製作完成這段過程的碳排當量，即可得知不同參數組別製造過程造成環境負擔的多寡、原始線材與再生線材在碳排放量的表現、以及影響碳排放量較大的關鍵列印參數，進而提供產品決策者能夠選擇碳排放量相對較少的材料與製造參數，降低整體生產過程對環境的影響。

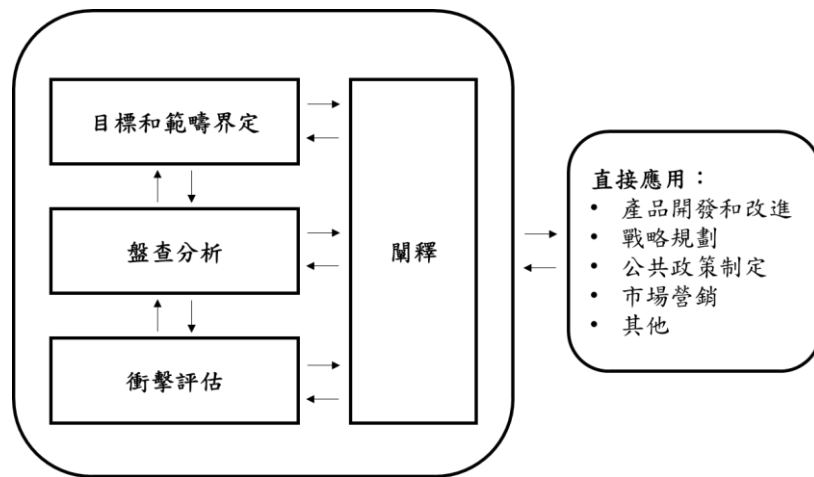


圖 1、生命週期評估框架

三、文獻回顧與探討

(一) 列印參數

現有的文獻中，尚未有對於使用再生 PLA 塑膠線材進行 3D 列印在健康與環境衝擊上的相關研究，但由於二次材料的實驗在數值量測與計算方式上均與一次材料相同，因此提及之文獻主要會先以一次材料作為討論基準。首先討論關於 PM 粒子與 VOCs 排放對人體健康的影響，接著再針對機器能源消耗帶來的碳排放量做闡述，最後再說明過去研究對於再生線材的探討。

Khaki 等人^[2]針對 FDP 列印過程中會產生懸浮微粒進行研究，發現其運作時，尤其是在擠出機（噴頭）開始加熱時，PM 值有明顯上升的現象，對密閉環境內的空氣品質有顯著的影響，需進一步通風才得以緩解。使用同個材質作為列印線材（PLA），在使用單一顏色、列印相同物品的情況下，改變列印參數中的填充密度、擠出溫度（列印噴頭溫度），其他參數保持不變，將填充密度、擠出溫度提高時，PM 粒子的排放數也會隨之提高；同樣地，Jeon 等人^[3]研究發現，將擠出溫度降低，即可減少 PM 粒子的排放數。此外，若採用同個材質的線材（PLA）並使用相同的列印參數、印製相同物品的情況下，不同的線材顏色也會分別產生不同的數量的 PM 懸浮粒子，意即列印線材的顏色可能會影響 PM 懸浮粒子的排放數，產生 PM 懸浮粒子之數量多寡的排序為：黑色 > 黃色 > 白色。Simon 等人^[4]發現在 3D 列印時，大多數的顆粒是在半液態的材料擠出至列印平台時產生，液態的 PLA 會釋放 VOCs，而這些有機化合物就會在接觸空氣時凝結。另外，他們也發現列印速度對於懸浮粒子的排放也有一定的影響，越快的列印速度可以降低排放量。Yi 等人^[5]發現，在 FDP 整體列印過程中會排放大量的顆粒，而研究表示人體暴露於 PM 的環境會增加罹患呼吸與心血管疾病的發病率與死亡率，應盡量減少懸浮粒子的排放。總結來說，列印參數中的填充率、擠出溫度對於 PM 值均為正相關，而列印速度對於 PM 值為負相關；同時也可以發現列印的總時間越長，會因為在過程中需要使線材融化而不斷地加熱噴頭，使懸浮粒子在列印過程中不斷排放，導致 PM 排放的總量較高。

在環境影響部分，列印參數的設定佔了極大的因素。Lunetto 等人^[6]測試各種不同參數的實驗，觀察各個列印階段，可以得知列印時間與耗能有著一定的關係，不論其他參數如何設置，只要列印機在列印階段，就必須消耗一定的能量來維持

運作，同時發現列印參數中的熱床溫度、擠出溫度均會明顯的影響列印機的耗能。Carmita^[7]指出列印參數中的擺放角度、填充圖案也會影響列印時間，且擺放角度是最大的影響因素；而填充圖案中的 Hexagram 與 Solid 和 Sparse double dense 相比，Hexagram 的結構使用的材料較少，有較少的擠出量，也就可以縮短打印時間，減少能量消耗。Hinshaw、Terry 和 Fidan^[8]指出列印參數中的殼層數若設定的較少、層厚若設定的較高，可以減少列印的時間，減少能源的消耗；而電機馬達其功耗較加熱噴嘴小，因此加熱噴頭（擠出溫度）為列印機主要耗能之關鍵。Enemuoh 等人^[9]從列印機各部分來觀察，發現整體耗能中，入料電機馬達只佔了 1.44%，風扇佔了 7.89%，而佔比最大的則是擠出機模組，佔了 90.67%，其中加熱噴頭佔了 63.32%、擠出電機馬達佔了 27.34%，可見加熱噴頭在整體耗能中佔有非常大的比重。總結來說，可以發現加熱為主要耗能的因素，列印參數中的擠出溫度、熱床溫度、填充率、填充圖案的密度、擺放角度、殼層數對於耗能均為正相關，層厚對於耗能为負相關；同樣地，列印的總時間越長，過程中不斷地加熱噴頭，耗能也會越高。

（二）田口方法與灰色關聯分析

在 Alafaghani 與 Qattawi^[10]的研究中，針對擠出溫度、層厚、填充圖案、填充率這四個列印參數對成品的尺寸精度與機械性能進行探討，並求得機器列印最佳參數以及參數重要排序；其研究透過田口方法來設計實驗、統計分析，在四個因子、每個因子各三個水準中，總共只需進行 27 個實驗組合，可以有效降低實驗次數，避免全因子實驗設計所帶來的高成本與時間花費。然而，田口方法中的均值分析(Analysis of Means, ANOM)與變異數分析(Analysis of Variance, ANOVA)只能各別針對單一性能進行分析，無法進行多因子的綜合性比較，因此 Kyriaki 等人^[11]除了使用田口方法進行實驗設計與分析，也額外使用灰色關聯分析進行多因子分析，雖然田口方法分析的結果與灰色關聯分析的結果相近，但灰色關聯分析除了表明擠出溫度是主導尺寸精度與機械性能的參數，也提供可以同時優化兩者表現的參數。此外，Pooja 等人^[12]也透過灰色關聯分析優化多個響應，分析填充圖案、填充率、列印速度和層厚中對表面粗糙度、列印時間與耗材的影響，除了得知對性能影響較大的重要參數外，還發現透過灰色關聯分析獲得的最佳綜合參數可以有 10%的改善。從上述文獻中，可以發現灰色關聯分析除了可以得知較

重要的參數、獲得優化所有表現的參數組合，還可以得知優化後的改善程度，是個非常適用於優化 FDM 製造技術的分析方法。

(三) 生命週期評估

Yunlong、Kieran 和 Yaoyao^[13]認為一般過去的研究在評估 LCA 時，都採用基於一般 LCA 框架開發的模型進行計算，但此模型下的範圍和邊界並不適用於 AM 製造工藝，需要一個通用於 AM 製造工藝的評估框架，讓設計更完善、獲得更好的優化效果，以減少對環境影響；而經實驗證明，透過新框架優化設計後的產品除了減少了近五成的體積、減少耗能，碳排放也有明顯地下降。另外，Fabricio 等人^[14]比較 AM 與傳統製造 (Conventional manufacturing, CM) 使用 ABS 回收材料對環境的影響，透過 LCA 評估發現 AM 在零件數量較少的情況下具有優勢，而 AM 的列印階段是影響 LCA 表現最大一個階段。而 Schwarz 等人^[15] 透過 LCA 盤查 25 種歐洲最常用的聚合物在各種回收處理方式的表現，發現 PLA 材質在大部分的回收技術中，與其他聚合物相比都有較好的碳排放表現；而透過閉環機械回收 (初級回收) 或是溶解技術 (三級回收) 進行回收再製，除了回收品質較好，也可以減少回收處理時所產生的碳排放。綜合以上，透過 LCA 可以了解各個產品或各種生產方式對環境所造成的影響，並可從中得知影響 LCA 表現的關鍵因素為何，進而選擇碳排放相對較少的製造方式，除了可以減少對環境的影響，也可以提高生產效率。

四、研究方法及步驟

(一) 實驗器材與環境

本實驗規劃採用 XYZ 型的 FDM 3D 列印機 (Original Prusa i3 MK3S^[16]) 進行印製，PM 懸浮粒子與 VOCs 則採用室內型空氣品質感測器 (EDIMAX AI-2002W^[17]) 進行量測；而耗能則採用智慧插座 (TP-Link HS110^[18]) 進行監測。

在前段文獻回顧中，可得知 PLA 在塑膠回收中具有良好的 LCA 表現，因此本研究選擇使用 PLA 材質作為實驗線材，原始線材與再生線材均為同一間台灣工廠所生產製造，線徑均為 1.75mm；而再生線材的原料來源為蒐集各工廠相同型號、且未經化學改性與額外加工之 PLA 下腳料 (亦稱邊料，指生產過程中多餘的剩料或廢料)，在不添加新料的情況下確保回收原料的品質。在實驗印製物品部分，則採用 ASTM (美國材料和試驗協會) D1708 測驗方法的試片規範做為本研究實驗的列印物品，試片尺寸之長度為 38mm、寬度為 15mm 厚度為 3mm，如圖 2 所示。

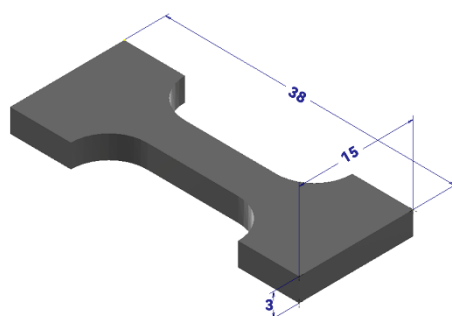


圖 2、ASTM-1708 (長度單位：mm)

在實驗環境部分，本研究將在大小約三坪左右的辦公室進行實驗，目的是為了模擬非工廠的一般空間、通風情況不像生產線環境那麼良好的情況下，使用 3D 列印製造時空氣品質的情況為何，並供小型辦公室、創客自造空間、或是一般家庭等使用情境作為參考。在環境布置部分如下頁圖 3 所示，空氣品質感測器將會固定置放於列印機左側 15 公分處，並於列印時關閉門窗、開啟循環風扇、將室溫維持在 25°C ($\pm 2^\circ\text{C}$)，在可控制環境內部空氣流通的狀態下進行量測，以確保每次實驗的準確性。

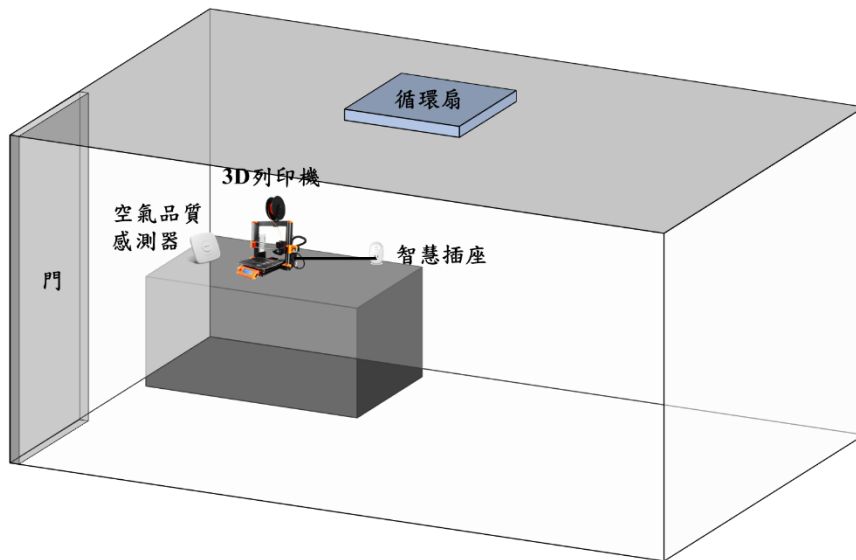


圖 3、實驗環境配置

(二) 實驗規劃

在統整相關文獻並進行對比後，歸納以下參數在健康或環境表現上有直接影響：線材顏色、填充率、擠出溫度、列印速度；而擠出溫度、熱床溫度、填充率、填充圖案、擺放角度、殼層數、層厚與風扇速度，都會影響到耗能表現。因此，本研究綜合影響這兩大表現的參數，將這十個參數作為實驗變因（因子）。在規劃各因子中的水準時，將參數範圍設定為常用的上邊界、中間值與下邊界，在後續數據分析時才能有較顯著的差異。本研究使用田口方法規劃實驗，總共採用十個因子，其中兩個因子（熱床溫度、風扇速度）各有兩個水準，其餘八個因子（擠出溫度、列印速度、填充率、填充圖案、線材顏色、層厚、殼層數、擺放角度）均各有三個水準，如下頁表 1 所示；按照田口方法，此情況下至少需要進行 36 組實驗才能做後續分析，因此採用 L36 直交表進行實驗規劃。其中，填充率之實際情形如下頁圖 4 所示；填充圖案之實際圖形如下頁圖 5 所示，參數名稱係依照 Ultimaker Cura 切層軟體^[19]之選項所列；擺放角度之實際情形如下頁圖 6 所示。

表 1、各因子之參數設定值

因子	水準		
	1	2	3
熱床溫度 (°C)	25 (關閉-室溫)	50 (開啟)	-
風扇速度 (%)	0 (關閉)	100 (開啟)	-
擠出溫度 (°C)	185	195	205
列印速度 (mm/s)	10	20	40
填充率 ¹ (%)	20	50	80
填充圖案 ²	Grid	Triangles	Tri-hexagon
線材顏色	Green	Blue	Black
層厚 (mm)	0.1	0.2	0.3
殼層數	1	2	3
擺放角度 ³ (°)	0	40	90

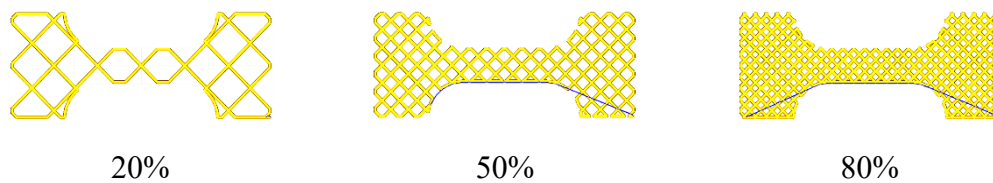


圖 4、各填充率之物品填充情形 (以填充圖案 Grid 為例)

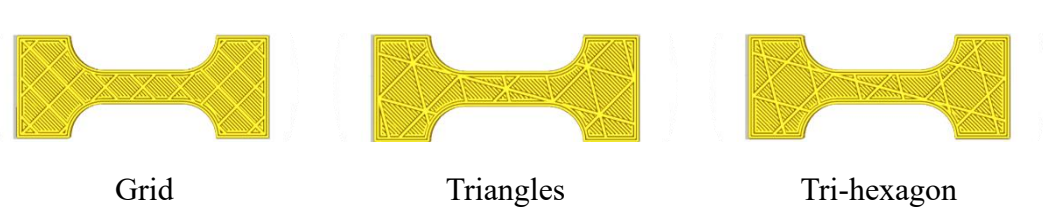


圖 5、各填充圖案之物品填充圖形

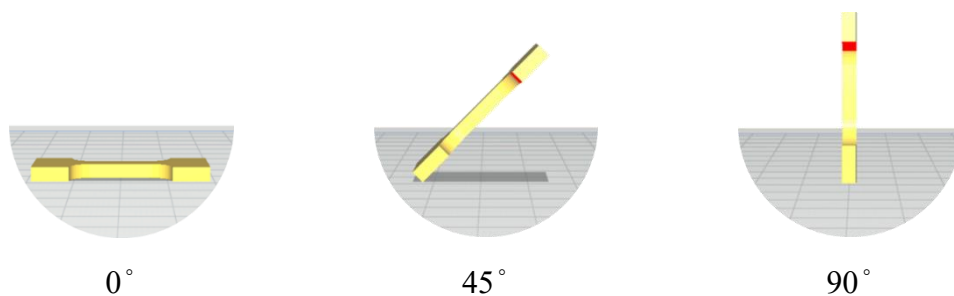


圖 6、各擺放角度之物品放置情形

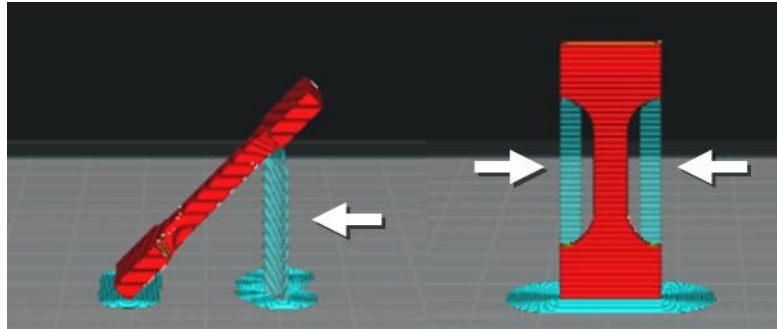


圖 7、物品擺放角度 45°（左）與 90°（右）之支撐材情形

如上圖 7 所示，當擺放角度為 45° 或 90° 時，因為會有列印物懸空的情形，在進行切層設定時會開啟支撐（Support – Everywhere，白色箭頭指向處），使物品在特殊角度下能在實驗中正常列印。所有實驗組合將透過 Minitab^[20] 統計軟體進行規劃，將所有因子、水準、實驗方法等設定至 Minitab 中，Minitab 即會規劃所有實驗組合中各項參數的水準。在所有實驗組合中，只有兩個水準的因子會重複進行 18 次；有三個水準的因子則會重複進行 12 次實驗，下頁表 2 為所有實驗各組之列印參數（為方便閱覽，已將水準代號替換成參數值）。

表 2、L36 各組別之列印參數總表

組別	熱床溫度 (°C)	風扇速度 (%)	擠出溫度 (°C)	列印速度 (mm/s)	填充率 (%)	填充圖案	線材顏色	層厚 (mm)	殼層數	擺放角度 (°)
1	25	0	185	10	20	Grid	Green	0.1	1	0
2	25	0	195	20	50	Triangles	Blue	0.2	2	45
3	25	0	205	40	80	Tri-hexagon	Black	0.3	3	90
4	25	0	185	10	20	Grid	Blue	0.2	2	45
5	25	0	195	20	50	Triangles	Black	0.3	3	90
6	25	0	205	40	80	Tri-hexagon	Green	0.1	1	0
7	25	0	185	10	50	Tri-hexagon	Green	0.2	3	90
8	25	0	195	20	80	Grid	Blue	0.3	1	0
9	25	0	205	40	20	Triangles	Black	0.1	2	45
10	25	100	185	10	80	Triangles	Green	0.3	2	90
11	25	100	195	20	20	Tri-hexagon	Blue	0.1	3	0
12	25	100	205	40	50	Grid	Black	0.2	1	45
13	25	100	185	20	80	Grid	Black	0.2	1	90
14	25	100	195	40	20	Triangles	Green	0.3	2	0
15	25	100	205	10	50	Tri-hexagon	Blue	0.1	3	45
16	25	100	185	20	80	Triangles	Green	0.1	3	45
17	25	100	195	40	20	Tri-hexagon	Blue	0.2	1	90
18	25	100	205	10	50	Grid	Black	0.3	2	0
19	50	0	185	20	20	Tri-hexagon	Black	0.3	1	45
20	50	0	195	40	50	Grid	Green	0.1	2	90
21	50	0	205	10	80	Triangles	Blue	0.2	3	0
22	50	0	185	20	50	Tri-hexagon	Black	0.1	2	0

23	50	0	195	40	80	Grid	Green	0.2	3	45
24	50	0	205	10	20	Triangles	Blue	0.3	1	90
25	50	0	185	40	50	Grid	Blue	0.3	3	0
26	50	0	195	10	80	Triangles	Black	0.1	1	45
27	50	0	205	20	20	Tri-hexagon	Green	0.2	2	90
28	50	100	185	40	50	Triangles	Blue	0.1	1	90
29	50	100	195	10	80	Tri-hexagon	Black	0.2	2	0
30	50	100	205	20	20	Grid	Green	0.3	3	45
31	50	100	185	40	80	Tri-hexagon	Blue	0.3	2	45
32	50	100	195	10	20	Grid	Black	0.1	3	90
33	50	100	205	20	50	Triangles	Green	0.2	1	0
34	50	100	185	40	20	Triangles	Black	0.2	3	0
35	50	100	195	10	50	Tri-hexagon	Green	0.3	1	45
36	50	100	205	20	80	Grid	Blue	0.1	2	90

規劃出所有實驗組合後，即可開始準備進行實驗；在列印之前，必須先將欲列印之模型檔案（STL 檔）匯入至切層軟體中（本研究使用 Ultimaker Cura 進行設定，如下圖 8 所示），並依照參數值設定列印檔案，使其能依照列印物件與設定建立數位檔案（G-code 檔），列印機即會按照軟體規劃的路徑與列印參數進行印製。

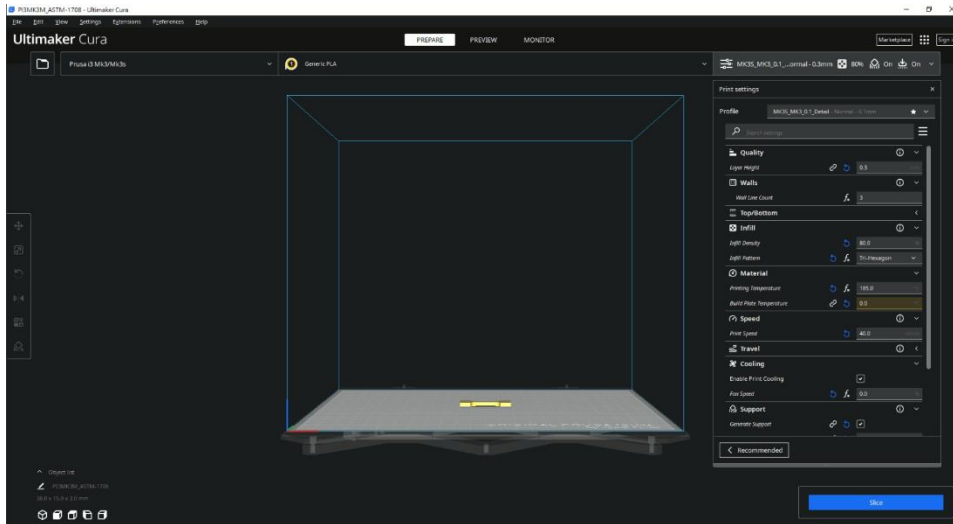


圖 8、Ultimaker Cura 切層軟體介面

（三）實驗流程

本實驗總共分成三個階段，分別為：原始線材的 36 組實驗（每組 3 次）、再生線材的 36 組實驗（每組 3 次）、分析後兩種線材的 GRA 最佳組合實驗（每組 3 次）。為確保實驗準確性，在每次實驗進行前都會開啟空氣濾清機，將環境內的空氣品質恢復至初始狀態（依照感測器偵測之數值），均下降至初始化數值後才開始進行實驗。在實驗進行時，為了能精準依照列印狀態進行量測，本研究統一透過 Python 程式收集耗電與感測器之數據。實驗過程中，程式會偵測耗電狀態自動判斷列印機是否處於列印狀態，因列印機待機狀態之耗電功率為每秒 9 瓦至 11 瓦內，當偵測到耗電功率超過 11 瓦，即代表列印機目前為列印狀態，程式即會自動紀錄每一秒的耗電量與空氣品質數值；當列印完成、耗電功率低於 11 瓦，程式即會自動停止收集，並將數據儲存為 CSV 檔，供後續統計分析使用。

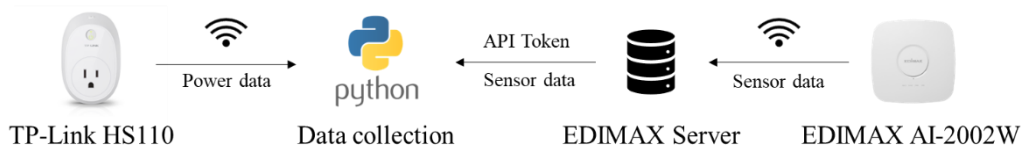


圖 9、資料收集流程

```

172 while True:
173     # Read sensor data from file
174     f.write("%i\n" % float(totalpower))
175
176     # flush
177
178     # calculate averages
179     avgTotal += float(data[0])
180     avgPower += float(data[1])
181     avgCofact += float(data[2])
182     avgVoc += float(data[3])
183
184     recordTime += 1
185
186     # print start time, start time, start time, start time
187     print("Start Time: %i, %i, %i, %i" % (start_time, start_time, start_time, start_time))
188     print("Record Time: %i, %i, %i, %i" % (record_time, record_time, record_time, record_time))
189     print("Power: %i, %i, %i, %i" % (power, power, power, power))
190     print("Total Power: %i, %i, %i, %i" % (totalPower, totalPower, totalPower, totalPower))
191     print("Cofact: %i, %i, %i, %i" % (Cofact, Cofact, Cofact, Cofact))
192     print("Voc: %i, %i, %i, %i" % (Voc, Voc, Voc, Voc))
193     print("Sensor: %i, %i, %i, %i" % (sensor, sensor, sensor, sensor))
194     print("Press Enter to stop.")
195     print("")
196
197     # sleep 10s
198     try:
199         time.sleep(10)
200     except KeyboardInterrupt:
201         quit()

```

圖 10、Python 數據監測與收集程式

(四) 灰色關聯分析

本研究欲了解十個因子的最佳的列印參數組合為何，因此必須使用多目標分析方法進行綜合性的分析；在前段文獻回顧中，可知灰色關聯分析適用於處理多種不同特徵的參數，意即可以將數種不同類型的數值結果簡化成一個數值，此數值即被稱為灰色關聯等級 (Grey Relational Grade, GRG)，下段將說明如何進行數據處理與分析。

1. 數據歸一化 (Normalized data results)

首先，先將數據進行歸一化，此目的即為將不同品質特性、不同範圍的數據無因次化、轉換至相等的範圍內，即可容易地比較不同種數據之優劣；而在計算前須根據品質特性型態（望大特性、望目特性、望小特性）選擇公式，而本研究觀察之品質特性（耗能、懸浮粒子、揮發性有機化合物）均為數值越小表現越好，因此都使用望小公式（式 1）進行計算，其中 $X_i^*(k)$ 之範圍為 0 至 1，而 1 代表是最佳值。

$$X_i^*(k) = \frac{\max[X_i(k)] - X_i(k)}{\max[X_i(k)] - \min[X_i(k)]} \quad (1)$$

2. 定義偏差序列 (Determination of deviation sequence)

參考序列指的是實驗數據中之最佳數值，比較序列為該組實驗值，其偏差值公式如下（式 2），其中 $x_0(k)$ 表示參考序列； $x_i(k)$ 表示比較序列； $\Delta_{oi}(k)$ 表示參考序列與比較序列間之偏差值。

$$\Delta_{oi}(k) = |x_0(k) - x_i(k)| \quad (2)$$

3. 灰色關聯係數 (Grey Relationship Coefficient, GRC)

灰色關聯係數為揭示參考序列與比較序列之間的關係，其計算公式如下（式 3），

其中 $\gamma_i(k)$ 是灰色關聯係數； Δ_{min} 是 Δ_{oi} 序列的最小值； Δ_{max} 是 Δ_{oi} 序列的最大值； ζ 是辨識區分係數，其數值範圍為 $0 \leq \zeta \leq 1$ ，通常使用 0.5，如欲使某數據之灰色關聯係數更為顯著，可將其值使用較高之數值，但其調整不影響灰色關聯度的排序，因本研究未著重某項數據，係數均以 0.5 進行計算與分析。

$$\gamma_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \times \Delta_{max}}{\Delta_{oi}(k) + \zeta \times \Delta_{max}} \quad (3)$$

4. 灰色關聯度 (Grey Relationship Grade, GRG)

最後一步即為計算灰色關聯度，將對各因子進行計算以選出最佳組別，其計算公式如下 (式 4)，其中 $\gamma_i(k)$ 即為上一步驟計算之灰色關聯係數。

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i(k) \quad (4)$$

以上四個步驟完成後，即可計算出每組實驗之 GRG 值，而若組別的 GRG 值越大，表示該組別的多目標特徵表現越好。

5. 變異數分析 (ANOVA)

為深入了解每項性能特徵影響的佔比，可以透過第四步驟所計算出來的灰色關聯度進行變異數分析，即可了解各個因子 (列印參數) 在性能表現上的影響程度。將計算完成的灰色關聯度輸入至先前設定好的 Minitab 分析軟體中，即可計算出各個因子哪一個水準影響較為顯著、相較之下表現較好。

(五) 生命週期評估

本研究使用 Umberto^[21] 分析軟體盤查每一組實驗的 LCA 數值，軟體介面與 LCA 製造流程如下頁圖 11 所示。LCA 盤查時須先界定盤查範圍，而本研究將從線材完整的產品生命週期 (原料的生產、使用、到回收) 進行計算。

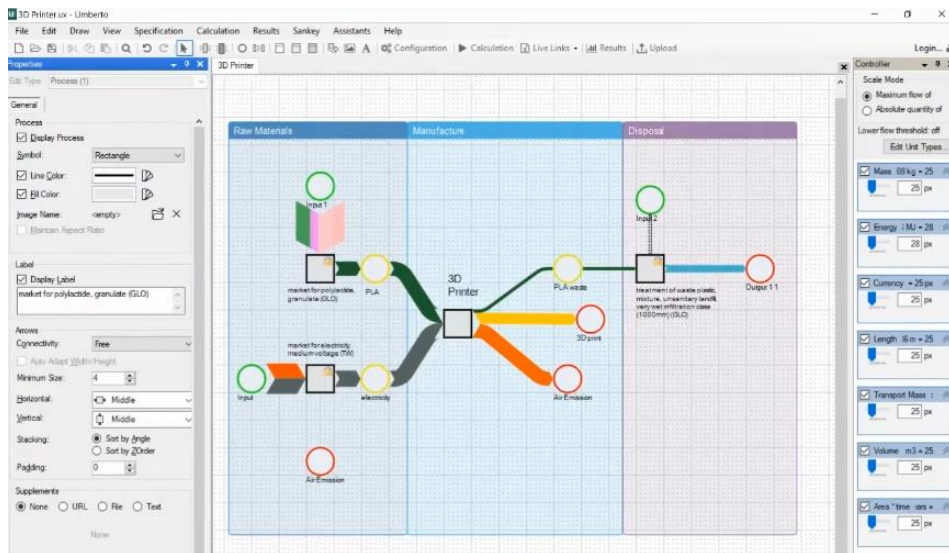


圖 11、Umberto 分析軟體與 LCA Process Flow

從上圖 11 中可以看到盤查 LCA 的製造流程分成三個階段：原始材料（Raw Materials）、製造（Manufacture）、處理（Disposal）。在原始材料部分，從列印線材的製造過程開始計算，包括：PLA 原料從國外運送至台灣、生產過程中所耗費之能源、包裝耗材、到運送至使用者端，但因為台灣線材廠商目前尚未針對其製造過程進行盤查，無法提供生產時所耗費的碳排放數據，因此部分項目使用 Umberto 軟體內建資料庫（Ecoinvent 與 Gabi）之數值代替，再生線材亦同；而電力生產所產生的碳排放數值係依 110 年度經濟部能源局公布之電力排碳係數：0.509 公斤 CO₂e/度^[22]進行計算；另外，此段製造過程中所排放的空氣污染也將納入計算。在製造過程中，也就是 3D 列印時，實驗過程所使用的材料、廢料（如：噴頭清潔、支撐材）、耗電量、以及製造過程造成的空氣污染等均會納入計算。最後為處理階段，即物件回收、處理過程中所耗費的材料與能源等，均會納入計算。上述提及之數值都可依照各個國家、工廠、製程方式等進行個別設定，如下圖 12 所示，設定流程完成後，將實驗量測到的結果輸入至軟體中，即可獲得當次列印組別的 LCA 數值（碳排當量）。

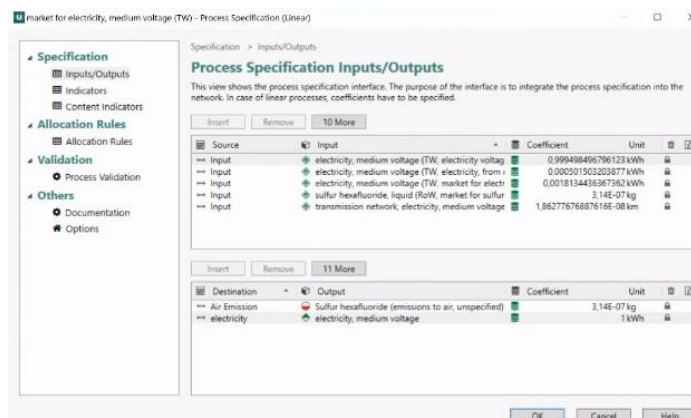


圖 12、各項過程碳排放單位數值設定

五、研究結果與討論

(一) 實驗數據

每一組別經過三次實驗後，將三次實驗所收集到的總量數值進行平均，所得到的數值即為該組平均的實驗結果，並以平均數值進行後續的分析，原始材料與再生材料所有組別的實驗數據如下表 3、表 4 所示：

表 3、原始線材所有實驗組別總量平均數據

組別	功耗總量 (W)	PM 2.5 總量 (ug/m ³)	PM 10 總量 (ug/m ³)	VOCs 總量 (ppb)	試片重 (g)	廢料重 (g)
1	19176	6816	7199	102208	1.1	0.1
2	39982	21631	23126	329615	1.4	0.4
3	26582	17085	18581	162752	1.5	0.5
4	32899	10847	11505	189193	1.4	0.4
5	55360	14110	15054	234278	1.6	0.5
6	22027	12789	14123	124307	1.2	0.1
7	33863	26839	30973	290625	1.5	0.5
8	12998	5598	5850	93906	1.4	0.1
9	56087	24088	25868	445185	1.0	0.4
10	43262	6837	7198	254203	1.5	0.6
11	37867	7939	8478	209179	1.2	0.1
12	71965	27492	29352	385482	1.5	0.4
13	63931	28895	30613	424443	1.4	0.6
14	18244	4377	4667	58843	1.5	0.1
15	107079	16808	18131	471097	1.3	0.6
16	51260	5517	6080	171910	1.5	0.5
17	56078	10463	11090	214472	1.2	0.6
18	18136	6051	6441	107077	1.4	0.1
19	57131	13167	13918	340541	1.4	0.3
20	136086	35078	38280	683435	1.4	0.6
21	51035	7088	7572	145165	1.5	0.1
22	48637	8932	9440	270743	1.2	0.1
23	81112	14860	15761	311426	1.5	0.4
24	68420	7981	8422	153185	1.3	0.5
25	34411	4644	4944	125293	1.4	0.1
26	126322	23590	24946	735375	1.3	0.5
27	81941	11701	12631	465522	1.4	0.6
28	194525	41656	43967	643529	1.2	0.6

29	54856	5378	5703	238587	1.4	0.2
30	87826	4633	5033	344985	1.5	0.3
31	91080	8279	8765	219117	1.4	0.5
32	218699	29483	31278	508219	1.4	0.7
33	56269	5777	6243	134816	1.4	0.1
34	52896	5145	5448	315809	1.4	0.1
35	75348	3407	3695	151166	1.5	0.4
36	241481	74939	81333	446048	1.3	0.6

表 4、再生線材所有實驗組別總量平均數據

組別	功耗總量 (W)	PM 2.5 總量 (ug/m ³)	PM 10 總量 (ug/m ³)	VOCs 總量 (ppb)	試片重 (g)	廢料重 (g)
1	19354	4848	5430	98018	1.1	0.1
2	35051	10178	14097	196312	1.4	0.4
3	26705	5235	5643	256200	1.5	0.5
4	30929	8167	8621	168104	1.4	0.4
5	24565	7855	8257	124861	1.4	0.6
6	22549	3533	3827	111423	1.2	0.1
7	35029	6489	7532	247417	1.4	0.6
8	11982	2902	3068	58512	1.4	0.1
9	57278	17571	18535	497020	1.0	0.5
10	42224	11756	12825	165618	1.4	0.6
11	34988	7515	8042	102579	1.2	0.1
12	73320	10381	11067	311100	1.5	0.5
13	55840	12632	13625	178042	1.2	0.7
14	18879	3978	4168	80385	1.4	0.1
15	83006	9818	10402	276183	1.3	0.5
16	54655	4593	4986	193938	1.3	0.1
17	58883	13429	14412	177297	1.2	0.6
18	19841	2797	2924	91619	1.4	0.1
19	59598	10497	11061	218751	1.4	0.4
20	155887	8032	8545	359004	1.2	0.4
21	48514	3307	3559	87619	1.5	0.1
22	48689	9749	10368	185832	1.2	0.1
23	82563	53398	11885	223833	1.3	0.1
24	75610	10935	11696	145963	1.3	0.6
25	37335	4525	4872	65705	1.4	0.1

26	123822	35881	38584	491686	1.3	0.5
27	86257	14474	15240	231066	1.3	0.6
28	219414	24216	27638	381093	1.2	0.6
29	55830	7471	8172	146418	1.4	0.1
30	87517	13386	13934	140633	1.4	0.5
31	48514	3307	3559	87619	1.4	0.4
32	224010	22632	24807	582532	1.4	0.6
33	59839	9367	9828	90979	1.4	0.1
34	53411	4297	4673	130904	1.3	0.1
35	88593	6125	6402	124355	1.4	0.5
36	261546	36196	38747	397308	1.4	0.6

(二) 灰色關聯分析

將所有實驗組別的總量平均數值帶入各項公式，分別計算原始線材和再生線材所有實驗組別的灰色關聯度，結果如下表 5 所示，排名第一的即為該線材種類中環境與健康綜合表現最好的組別。原始線材的最佳組別為第十四組（組別參數：熱床溫度 25℃、風扇速度 100%、擠出溫度 195℃、列印速度 40 mm/s、填充率 20%、填充圖案為 Triangles、線材顏色為 Green、層厚 0.3mm、殼層數為 2、擺放角度為 0°），GRG 值為 0.976；再生線材的最佳組別為第八組（組別參數：熱床溫度 25℃、風扇速度 0%、擠出溫度 195℃、列印速度 20 mm/s、填充率 80%、填充圖案為 Grid、線材顏色為 Blue、層厚 0.3mm、殼層數為 1、擺放角度為 0°），GRG 值為 0.997。對比原始線材與再生線材最佳組別的實驗結果，無論是耗能、PM、或是 VOCs，再生線材的排放總量均小於原始線材。

表 5、原始線材與再生線材所有組別 GRG 排名

組別	原始線材		再生線材	
	GRG	排名	GRG	排名
1	0.916	4	0.904	8
2	0.673	26	0.722	21
3	0.776	18	0.811	12
4	0.808	14	0.789	14
5	0.733	22	0.828	11
6	0.836	10	0.919	4
7	0.658	27	0.773	18
8	0.949	2	0.997	1
9	0.616	28	0.568	31

10	0.814	13	0.724	20
11	0.823	11	0.830	10
12	0.592	30	0.659	28
13	0.587	31	0.693	24
14	0.976	1	0.940	3
15	0.614	29	0.668	27
16	0.846	8	0.809	13
17	0.772	19	0.682	25
18	0.924	3	0.957	2
19	0.711	23	0.700	23
20	0.473	34	0.630	29
21	0.841	9	0.905	6
22	0.779	17	0.734	19
23	0.680	24	0.563	32
24	0.808	15	0.710	22
25	0.903	5	0.911	5
26	0.530	32	0.418	35
27	0.676	25	0.627	30
28	0.432	35	0.446	33
29	0.821	12	0.777	17
30	0.770	20	0.677	26
31	0.759	21	0.905	6
32	0.487	33	0.429	34
33	0.855	7	0.782	16
34	0.805	16	0.847	9
35	0.858	6	0.785	15
36	0.367	36	0.383	36

(三) 變異數分析

得到 GRG 數值後，將各組之 GRG 值輸入至 Minitab 中進行 ANOVA 分析，即可得知所有因子中各個水準的貢獻程度，每種線材的分析結果均包含一個影響程度詳細數值表（如下頁表 6、表 7 所示，各因子水準中貢獻度最高者將用底線表示），以及一張影響程度折線圖（如下圖 13、圖 14 所示）。從各因子之貢獻度中可以得知，在原始線材中，擺放角度影響環境與健康相較其他因子更為顯著，最大差距為 0.2371；而風扇速度影響最不顯著，最大差距僅 0.0147，由此可知風扇開啟（100%）與關閉（0%）對於環境與健康影響不大。

表 6、原始材料各因子水準貢獻度

因子	水準			最大差距	排名
	1	2	3		
熱床溫度	<u>0.7729</u>	0.6975	-	0.0754	4
風扇速度	<u>0.7426</u>	0.7279	-	0.0147	10
擠出溫度	<u>0.7515</u>	0.7313	0.7229	0.0286	8
列印速度	<u>0.7566</u>	0.7308	0.7183	0.0383	7
填充率	<u>0.764</u>	0.7078	0.7338	0.0562	5
填充圖案	0.7047	0.7441	<u>0.7569</u>	0.0523	6
線材顏色	<u>0.7798</u>	0.7291	0.6968	0.0831	3
層厚	0.6432	0.7307	<u>0.8317</u>	0.1885	2
殼層數	0.7372	0.7238	<u>0.7447</u>	0.0208	9
擺放角度	<u>0.869</u>	0.7048	0.6319	0.2371	1

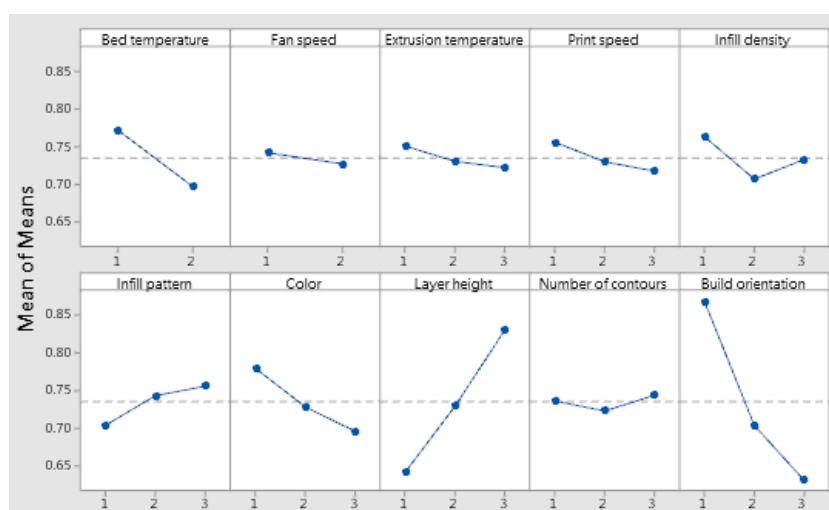


圖 13、原始材料各因子水準貢獻度分佈

再生材料中，最為顯著的因子與原始材料相同，均為擺放角度貢獻度最高，最大差距為 0.2306；而最不顯著的因子為列印速度，與原始材料不同，最大差距為 0.0082。由此可知，無論是原始材料或再生材料，擺放角度均為影響環境與健康的關鍵因子，原因是當擺放角度為 45° 或 90° 時，其列印需堆疊的層數均比擺放角度為 0° 時來得多，並且需要額外列印支撐材，這些都導致列印時間增加，進而影響到環境與健康的表現；然而，這不代表只要擺放角度為 0° 就可以獲得最佳的表現，需要視列印物件的型態而定，在物品可正常列印的情況下盡量降低最高列印高度與支撐材的數量，減少列印時間，即可獲得較好的環境與健康表現。

表 7、再生材料各因子水準貢獻度

因子	水準			最大差距	排名
	1	2	3		
熱床溫度	<u>0.7929</u>	0.6794	-	0.1136	3
風扇速度	<u>0.7505</u>	0.7218	-	0.0287	8
擠出溫度	<u>0.7696</u>	0.7168	0.7222	0.0528	5
列印速度	0.7366	0.7318	<u>0.7401</u>	0.0082	10
填充率	0.7253	0.7412	<u>0.742</u>	0.0167	9
填充圖案	0.716	0.7249	<u>0.7676</u>	0.0516	6
線材顏色	<u>0.7611</u>	0.7457	0.7018	0.0593	4
層厚	0.6448	0.7349	<u>0.8287</u>	0.1839	2
殼層數	0.7246	0.7297	<u>0.7542</u>	0.0297	7
擺放角度	<u>0.8752</u>	0.6886	0.6447	0.2306	1

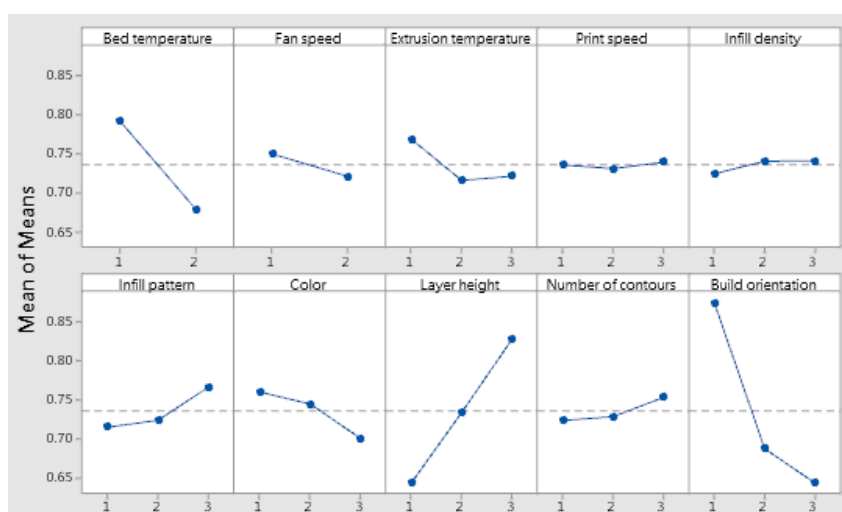


圖 14、再生材料各因子水準貢獻度分佈

(四) 生命週期評估與碳排放量

在計算碳排放時，分為兩個部分進行分析，(一)針對實驗過程中列印機的耗能換算成碳排當量，可得知當次列印能源耗費的碳足跡；(二)使用生命週期評估盤查該組實驗整體的生命週期，即可得知該組別從原料生產、製造、使用至回收整段過程產生的碳排當量；而兩者碳足跡計算時均統一使用二氧化碳當量(Carbon dioxide equivalent, CO₂e)作為標準單位，兩種線材所有組別平均碳排放的計算結果如下頁表 8 所示。在 LCA 部分，本研究使用了兩種計量方式，除了計算列印一個物件所排放的 CO₂e，額外換算了該物件列印一公斤時所產生的 CO₂e，以便觀察與分析。

碳排放的結果顯示第八組在兩種線材中均為耗能、LCA 數值最低的組別。而根據

LCA 結果顯示，列印耗能對碳排放所造成的影響相較 PM 與 VOCs 更為顯著，原因是耗能在計算上所佔的份額比 PM 與 VOCs 都還要大；此外，也可以從耗能的 CO₂e 數值與 LCA 的 CO₂e 數值發現到兩者具有高度的正相關性，由此可知耗能對於碳排放具有一定的主導地位。以整體表現來說，再生線材 LCA 的 CO₂e 有些微偏高的情形，原因是在原料生產階段，再生線材在計算 LCA 時包含了前置處理所產生的碳排放，進而導致整體 LCA 表現略差於原始線材。

表 8、原始線材與再生線材所有組別平均碳排放 (CO₂e 單位：g)

組別	原始線材			再生線材		
	耗能	LCA (1pc)	LCA (1Kg)	耗能	LCA (1pc)	LCA (1Kg)
1	2.71	14.00	13124	2.74	14.36	13458
2	5.65	39.40	27488	4.96	26.53	18948
3	3.76	26.78	18267	3.78	21.11	14075
4	4.65	26.60	18550	4.37	22.74	16241
5	7.83	41.34	26394	3.47	18.19	12993
6	3.11	16.59	13455	3.19	16.67	13895
7	4.79	23.97	16369	4.95	27.16	18948
8	1.84	9.78	6982	1.69	9.02	6442
9	7.93	42.47	42469	8.10	43.20	43201
10	6.12	32.91	21939	5.97	29.71	21222
11	5.35	28.80	24000	4.95	26.53	22106
12	10.18	53.35	35566	10.37	55.33	36885
13	9.04	47.19	34522	7.90	41.27	35370
14	2.58	12.55	8605	2.67	13.64	9744
15	15.14	78.50	62032	11.74	61.29	48390
16	7.25	36.03	24584	7.73	44.34	34106
17	7.93	32.86	26640	8.33	40.58	33815
18	2.56	13.48	9862	2.81	14.40	10286
19	8.08	43.07	30723	8.43	45.47	32482
20	19.24	86.62	63598	22.04	117.46	97882
21	7.22	34.18	22785	6.86	35.57	24253
22	6.88	33.12	28432	6.88	38.59	33073
23	11.47	61.33	40883	11.67	62.15	47807
24	9.67	50.14	38674	10.69	58.30	43726
25	4.87	24.59	17960	5.28	28.04	20030
26	17.86	94.33	72561	17.51	93.22	71711

27	11.59	62.27	44481	12.20	65.18	50138
28	27.51	140.00	119996	31.03	161.27	138231
29	7.76	40.46	28254	7.89	42.68	29775
30	12.42	63.39	43250	12.37	65.94	47099
31	12.88	68.79	47940	6.86	36.38	25986
32	30.92	160.45	114604	31.67	165.71	121254
33	7.96	45.30	31634	8.46	44.77	31981
34	7.48	40.34	28127	7.55	36.34	28693
35	10.65	60.26	40166	12.53	66.70	47641
36	34.15	151.76	113844	36.98	197.82	141299

(五) 最佳組合驗證

在第二步驟 (GRA 分析) 與第三步驟 (ANOVA 分析) 中, 可以知道兩種線材各因子中的最佳水準, 將所有因子的最佳水準組合後, 即為該線材下的最佳組合。本研究將驗證最佳組合能否帶來更好的表現, 兩種線材的最佳組合參數如下表 9、表 10 所示; 可以透過式 5 預測最佳組合的 GRG 值, 其中 γ_t 為所有組別的平均 GRG 值; p 為因子總數量; γ_i 為各因子水準的平均 GRG 值。

$$\hat{r} = r_t + \sum_{i=1}^p (r_i - r_t) \quad (5)$$

表 9、原始材料最佳組合參數

因子	最佳水準	參數
熱床溫度	1	25
風扇速度	1	0
擠出溫度	1	185
列印速度	1	10
填充率	1	20
填充圖案	3	Tri-hexagon
線材顏色	1	Green
層厚	3	0.3
殼層數	3	3
擺放角度	1	0
預測 GRG 值	1.15	

表 10、再生材料最佳組合參數

因子	最佳水準	參數
熱床溫度	1	25
風扇速度	1	0
擠出溫度	1	185
列印速度	3	40
填充率	3	80
填充圖案	3	Tri-hexagon
線材顏色	1	Green
層厚	3	0.3
殼層數	3	3
擺放角度	1	0
預測 GRG 值	1.16	

每種線材的最佳組合會進行三次實驗，並與先前實驗方法相同，經過實驗後，將三次數據進行平均處理，原始材料與再生材料最佳組合（組別名以 OP 代稱）的實驗數據如下表 11、表 12 所示；為了方便比較，同時放上最佳組別的實驗數據以便觀察。

表 11、原始線材最佳組別與最佳組合總量平均數據

組別	功耗總量 (W)	PM 2.5 總量 (ug/m ³)	PM 10 總量 (ug/m ³)	VOCs 總量 (ppb)	試片重 (g)	廢料重 (g)
14	18243.67	4377.33	4667.33	58842.67	1.47	0.1
OP	9742.82	2003.33	2101.67	47693.67	1.4	0.1

表 12、再生線材最佳組別與最佳組合總量平均數據

組別	功耗總量 (W)	PM 2.5 總量 (ug/m ³)	PM 10 總量 (ug/m ³)	VOCs 總量 (ppb)	試片重 (g)	廢料重 (g)
8	11982.33	2902.00	3068.33	58511.67	1.4	0.1
OP	9556.54	1316.67	1410.67	46618.67	1.4	0.1

計算兩種線材最佳組合的 GRG 值，並與最佳組別進行比較，結果如下表 13 所示，原始線材與再生線材的最佳組合都有大約 6% 的優化，雖低於預測值，但在環境與健康的表現上仍具有顯著的改善，也驗證了最佳水準的分析結果。

表 13、原始線材與再生線材最佳組別與最佳組合 GRG 比較

	原始線材		再生線材	
	14	OP	8	OP
GRG	0.976	<u>1.037</u>	0.997	<u>1.055</u>
優化度	6.22%		5.82%	

最後，本研究也計算了最佳組合的平均碳排放 CO₂e 值，並與最佳組別進行比較，結果如下表 14 所示，雖然碳排放的表現並未計入 GRA 中，但可以看到最佳組合在 LCA 的表現上也有良好改善程度，優化幅度可達二至四成，且再生線材的碳排當量低於原始線材，表示再生線材在最佳組合具有較好的碳排放表現。

表 14、原始線材與再生線材最佳組別與最佳組合平均碳排放比較 (CO₂e 單位：g)

	原始線材		再生線材	
	14	OP	8	OP
耗能	2.58	<u>1.38</u>	1.69	<u>1.35</u>
LCA (1pc)	12.55	<u>7.36</u>	9.02	<u>7.06</u>
LCA (1Kg)	8605	<u>5255</u>	6442	<u>5046</u>
LCA 優化度	41.7%		21.7%	

綜合以上分析，無論是最佳組別還是最佳參數組合，再生線材在環境、健康和碳排放均比原始線材具有更好的表現。然而，再生線材在製造過程中仍會產生一定程度的 PM 粒子與 VOCs，列印期間仍須注意環境通風情形，並盡量遠離列印機器，以避免長期吸入對人體造成危害。

六、結論

本研究旨在探討使用再生 PLA 線材進行 3D 列印時，對環境、健康和碳排放的影響，並與原始線材進行比較。經過灰色關聯分析、ANOVA 分析與生命週期評估，均顯示再生線材在最佳組別與多目標最佳組合中具有最好的表現，並得知擺放角度、層厚與熱床溫度是主導表現的關鍵參數；此外，經過優化所獲得的最佳組合，在環境與健康表現中獲得 5.8% 的改善、減少約 21.7% 的碳足跡，證實了再生線材在 3D 列印中的發展潛力，也建議個人用戶或製造決策者能夠採用再生線材，減少製造過程中對人體健康造成危害的可能，同時減少碳足跡和資源浪費。

本研究探討了十個因子對於再生 PLA 線材在各表現上的影響程度，未來可進一步探討貢獻度較高的因子，包括：擺放角度、層高、線材顏色與熱床溫度，除了能更深入地了解再生線材在這些參數下的性能表現，也可以避免 GRG 因為因子過多而在最佳組合時有超過 1 的情況，獲得更精準的優化結果。另外，本次探討的再生線材屬於閉環回收再製，未經過消費者使用，沒有繁雜的回收處理步驟，未來可探討開環回收的再生線材是否能有一樣的環境與健康表現，以及在碳足跡表現上是否會有大幅的差異。此外，在 LCA 盤查中發現 PM 與 VOCs 在碳排放所佔的份額極小，幾乎可以忽略不計，因此未來可著重在優化列印過程的耗能表現，盡可能地縮短列印時間，進而降低碳足跡和對環境的影響。另外需注意的是，LCA 可能會因為研究人員、調查方法、邊界範圍、數據資料來源或地理位置的不同，在數值或結論上可能會與其他研究結果有所不同，期待台灣有更多廠商開始盤查產品的生命週期、計算出產品實際的碳排放量，使未來的研究中能夠獲得更精確的 LCA 數值，找出降低環境影響的解方、優化製造流程，讓地球永續更加實現。

七、參考文獻

- [1] ISO 14040:2006. (2014, August 12). ISO. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- [2] Shirin Khaki, Emer Duffy, Alan F. Smeaton, Aoife Morrin. (2021) Monitoring of Particulate Matter Emissions from 3D Printing Activity in the Home Setting. *Sensors (Basel)*, 2021 May; 21(9): 3247.
- [3] Haejoon Jeon, Jihoon Park, Sunju Kim, Kyungho Park, Chungsik Yoon. (2020) Effect of nozzle temperature on the emission rate of ultrafine particles during 3D printing. *Indoor Air*, 2020 Mar; 30(2): 306-314.
- [4] Timothy R. Simon, Wo Jae Lee, Benjamin E. Spurgeon, Brandon E. Boor, Fu Zhao. (2018) An Experimental Study on the Energy Consumption and Emission Profile of Fused Deposition Modeling Process. *Procedia Manufacturing* Volume 26, 2018, Pages 920-928.
- [5] Jinghai Yi, Ryan F. LeBouf, Matthew G. Duling, Timothy Nurkiewicz, Bean T. Chen, Diane Schwegler-Berry, M. Abbas Virji, Aleksandr B. Stefaniak. (2016) Emission of particulate matter from a desktop three-dimensional (3D) printer. *J Toxicol Environ Health A*, 2016; 79(11): 453-65.
- [6] Vincenzo Lunetto, Paolo C. Priarone, Manuela Galati, Paolo Minetola. (2020) On the correlation between process parameters and specific energy consumption in fused deposition modelling. *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 56, Part A, August 2020, Pages 1039-1049.
- [7] Carmita Camposeco-Negrete. (2020) Optimization of printing parameters in fused deposition modeling for improving part quality and process sustainability. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* volume 108, Pages 2131–2147.
- [8] Hunter James Hinshaw, Shane Terry, Ismail Fidan. (2020) Power consumption investigation for fused filament fabricated specimen. *International Journal of Rapid Manufacturing* Vol. 9, No. 2-3.
- [9] Emmanuel Ugo Enemuoh, Venkata Gireesh Menta, Abdulaziz Abutunis, Sean O'Brien, Labiba Imtiaz Kaya, John Rapinac. (2021) Energy and Eco-Impact Evaluation of Fused Deposition Modeling and Injection Molding of Polylactic Acid. *Sustainability* 13, no. 4: 1875.
- [10] Ala'aldin Alafaghani, Ala Qattawi. (2018) Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 36, 2018, Pages 164-174.
- [11] Aslani, K., Chaidas, D., Kechagias, J., Kyratsis, P., & Salonitis, K. (2020). Quality Performance Evaluation of Thin Walled PLA 3D Printed Parts Using the Taguchi

- Method and Grey Relational Analysis. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(2), 47.
- [12] Patil, P., Singh, D., Raykar, S. J., & Bhamu, J. (2021). Multi-objective optimization of process parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) for printing Polylactic Acid (PLA) polymer components. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4880–4885.
- [13] Patil, P., Singh, D., Raykar, S. J., & Bhamu, J. (2021b). Multi-objective optimization of process parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) for printing Polylactic Acid (PLA) polymer components. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4880–4885.
- [14] Garcia, F. L., Nunes, A. K. F., Martins, M. D., Belli, M., Saavedra, Y. M. B., Silva, D. a. L., & Da Silva Moris, V. A. (2021). Comparative LCA of conventional manufacturing vs. additive manufacturing: the case of injection moulding for recycled polymers. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(6), 1604–1622.
- [15] Schwarz, A., Ligthart, T., Bizarro, D. G., De Wild, P., Vreugdenhil, B., & Van Harmelen, T. (2021). Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach. *Waste Management*, 121, 331–342.
- [16] Original Prusa i3 MK3S+, <https://www.prusa3d.com/category/original-prusa-i3-mk3s>.
- [17] EDIMAX AI-2002W Smart Wireless Indoor Air Quality Detector with 7-in-1 Multi-Sensor, https://www.edimax.com/edimax/merchandise/merchandise_detail/data/edimax/tw/air_quality_monitoring_indoor/ai-2002w.
- [18] TP-LINK HS110 Kasa Smart Wi-Fi Plug with Energy Monitoring, <https://www.tp-link.com/us/home-networking/smart-plug/hs110>.
- [19] Ultimaker Cura, <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>.
- [20] Data Analysis, Statistical & Process Improvement Tools | Minitab. (n.d.). <https://www.minitab.com/en-us/>.
- [21] Life Cycle Assessment (LCA) Software | Umberto. (n.d.). <https://www.ifu.com/umberto/lca-software/>.
- [22] 中華民國經濟部(Ministry of Economic Affairs,R.O.C.)全球資訊網. (n.d.). 經濟部公布最新全國電力資源供需報告及 110 年電力排碳係數 . https://www.moea.gov.tw/Mns/populace/news/News.aspx?kind=1&menu_id=40&news_id=100931.

致謝

感謝國家科學及技術委員會對於本研究計畫的支持，並感謝永續創新實驗室的楊政融教授在研究過程中給予指導、提供實驗器材。最後也感謝 DAAD-RISE Program 獎學金得主 Tim de Ancos 於永續創新實驗室擔任實習生時給予提點與協助，使本研究能夠順利完成。