

114 年度氣候變遷創意實作競賽

決賽作品說明書

隊伍編號+名稱	05 淨碳吉
作品中文名稱	以3D列印碳材選擇性純化二氧化碳
作品英文名稱	Selective CO ₂ purification via 3D-printed carbon-based adsorbents

參賽學校：國立臺灣大學、國立宜蘭大學

指導老師：劉雅瑄 教授

團隊成員：吳翊寧、楊思柔、張閔巖

摘要

3D列印規模化生產高比表面積 ($1755 \text{ m}^2/\text{g}$)、高選擇性二氧化碳吸附碳材。針對工廠煙道尾氣條件下經測試證實具高二氧化碳選擇性，藉由調整規模化生產二氧化碳吸附碳材製備條件，建立具經濟效益之可行性材料。

Abstract

Scaled-up 3D printing production of high specific surface area ($1755 \text{ m}^2/\text{g}$), highly selective CO_2 absorbing carbon materials. Tested under industrial flue gas conditions, the materials demonstrated high CO_2 selectivity. By adjusting the preparation conditions for scaled production, an economically viable adsorbent was developed.

目錄

摘要	1
Abstract.....	1
一、 問題界定	3
1.1 環境議題	3
1.2 目前政策	5
1.3 碳捕捉與封存技術 (Carbon Capture and Storage, CCS).....	5
1.4 化學吸收劑	7
1.5 活性碳吸附劑	8
1.6 解決方法	8
二、 研究歷程	9
2.1 動機與目的.....	9
2.2 發展歷程.....	9
三、 作品說明圖	11
3.1 建立模型.....	11
3.2 MRPP 光敏樹脂	12
3.3 活性碳製備.....	12
四、 預期成果及可行性評估	13
4.1 預期成果.....	13
4.2 經濟成本考量.....	13
五、 市場潛力	16
5.1 SWOT+USED 分析	16
5.2 STP 分析	17
六、工作分配	18
參考資料	19

一、 問題界定

1.1 環境議題

隨著經濟的快速發展，能源需求不斷攀升。自工業革命以來，主要的能源供應基本依賴於燃燒傳統的非再生化石燃料。然而，化石燃料的過度使用導致大量人為溫室氣體排放到大氣中，引發環境變遷問題，其中又以二氧化碳的影響最為顯著。早在千年之前二氧化碳濃度就保持恆定，直到工業化前大氣中二氧化碳濃度為280 ppm (Kabir et al., 2023)，根據NOAA全球監測實驗室之報告顯示2023年全球平均含量421 ppm，創下歷史新高，表示與過去相比上升近50% (NOAA Climate.gov., 2024)，如圖1。並且相較於1850-1900年，人類在2010-2019年時，導致全球表面溫度上升了約1.07°C (IPCC, 2021)，如圖2。從IPCC的數據顯示出2030年至2052年間的平均溫度將會高出工業化前時期1.5度 (Lim et al.,2024)。若溫度上升4°C，強降水的量將會增加30.2%，乾旱發生頻率將會變成4.1倍 (IPCC, 2021)。

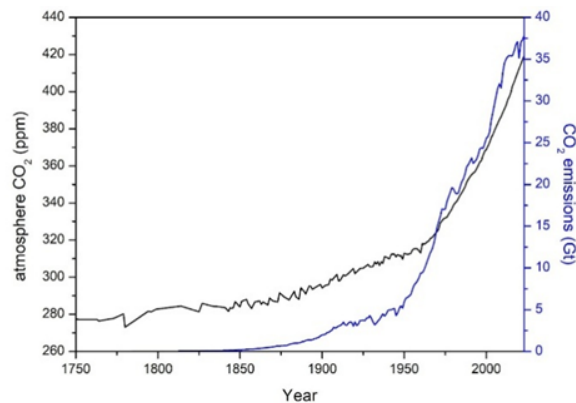


圖1.大氣二氧化碳含量和人為二氧化碳排量之歷史數據圖(Our World in Data)

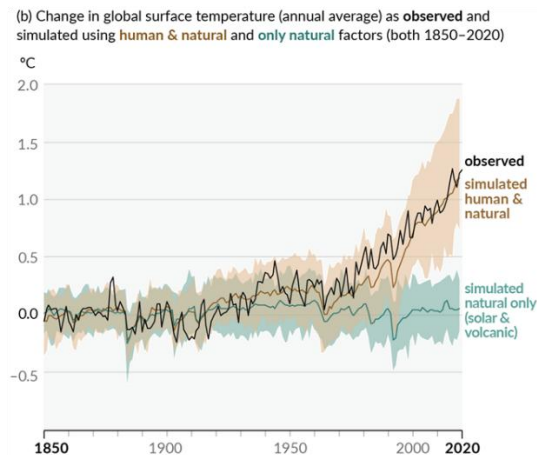


圖2.1850-2020年全球表面溫度變化在僅有自然因素影響、自然及人為因素影響的模擬結果，以及實際觀測結果 (IPCC, 2021)

溫室氣體是溫度上升主因，其中二氧化碳造成最多升溫 (圖3)，人類每排放 1000 Gt 二氧化碳，可能使全球溫度上升 0.27°C - 0.63°C (圖4) (IPCC, 2021)。如果要穩定二氧化碳對全球溫度上升的影響，必須達到淨零碳排 (IPCC, 2018)，其中碳捕捉和封存技術是達成淨零碳排的重要方式 (環境部，2022)。

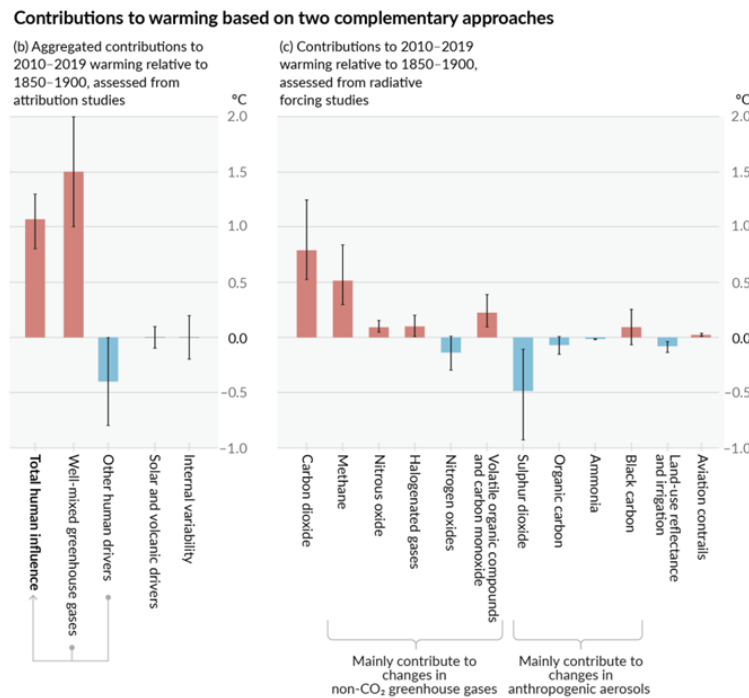


圖3.全球暖化因素 (IPCC, 2021)

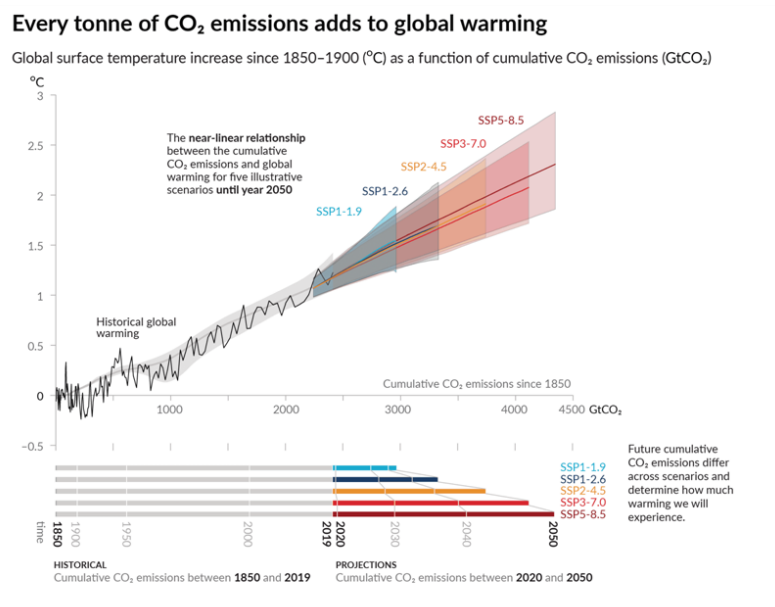


圖4.全球溫度變化與二氧化碳累積排放量的關係 (IPCC, 2021)

1.2 目前政策

目前全球已有75個國家或地區實施碳定價，中華民國環境部亦將於2026年向CO₂年排放量超過2.5萬公噸的電力、燃氣供應業與製造業徵收碳費。碳費計算方式為收費排放量乘以徵收費率，目前徵收費率為每噸300元，未來將逐步提升，若能於繳費前一年提出「自主減量計畫」、符合「徵收對象溫室氣體減量指定目標」，便能以優惠費率計算碳費。因此淨零碳排重要性日益上升。

1.3 碳捕捉與封存技術 (Carbon Capture and Storage, CCS)

為減緩全球暖化，需要減少能源和其他能源密集產業的二氧化碳排放以改善環境影響，因此可藉由碳捕捉與封存技術 (Carbon Capture and Storage, CCS) 協助全球脫碳 (IEA., 2013)，從發電廠、鋼鐵及水泥工業等大型碳排來源中捕獲二氧化碳，並轉移至安全無虞的存放點，如地下地質構造中永久儲存，如圖2。

因技術的限制導致目前CCS的大規模應用具高成本，高成本的地方在於技術中的空氣分離、MEA的溶劑再生和壓縮二氧化碳，雖減碳措施可以減少CCS的能源成本，但CCS本身的運行會消耗大量能量須以熱能和電能的形式進行 (Yang et al.,2024)。CCS有許多不同的技術能進行碳捕捉，主流的方法包含燃燒後捕集二氧化碳、燃燒前捕集二氧化碳和純氧燃燒模式 (Moreno et al.,2024)。燃燒後捕集二氧化碳是把煙氣送入吸收塔，吸收塔內有MEA溶劑能去除CO₂，帶有CO₂的MEA溶劑被帶入脫附塔，在蒸氣的幫助下溶劑被再生，並釋放出CO₂，再生完的MEA溶劑被轉回吸收塔，形成循環 (Jaffar et al.,2024)。接著是燃燒前捕集二氧化碳，它先把燃料轉為氫氣和一氧化碳的混和物，一氧化碳會和水蒸氣發生反應，產生更多的二氧化碳，將二氧化碳分離收集或再利用。氫氣會被拿去成為燃燒燃料，達到零碳排放的目的 (Allah et al.,2024)。純氧燃燒模式是使用純氧代替空氣來燃燒燃料的方式，此方法能顯著提高煙氣中二氧化碳的濃度，同時去除煙氣中的氮氣成分，燃燒火焰穩定，能增加燃燒效率 (Lee et al.,2024)。

而大部分的工廠都使用燃燒後捕集二氧化碳是因為它擁有極強的相容性，可以改造到任何設施，它跟其他的方法相比也有許多優勢，在燃燒前捕集二氧化碳中需要使用反應器來將燃料轉化為合成氣體，但在轉化過程中會產生大量CO₂，為了減少這些CO₂將會產生更高的費用。而純氧燃燒模式雖然在理論上效果很好，但研究表明穩定且高濃度的O₂載體因目前技術不夠成熟而很難被實現出來。目前

大眾廣泛使用燃燒後捕集二氧化碳的技術 (Hasan et al.,2024)。

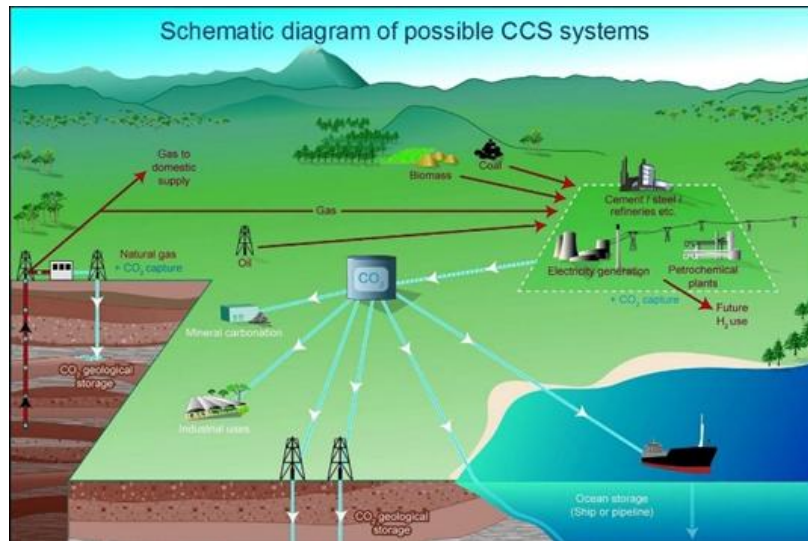


圖2.CCS系統可能的路徑(IPCC., 2005)

自2014年全球首個商業規模Boundary Dam燃煤發電廠碳捕捉計畫啟用 (圖3)，該計畫透過改裝老舊的3號機組升級後總容量為160兆瓦(MW)、淨發電量110兆瓦(MW)，整合發電與二氧化碳捕捉設施，使用胺類溶劑有效捕捉煙道氣中的二氧化碳，開創了燃燒後碳捕捉技術應用的新里程碑 (Stéphenne., 2014)。原訂每年捕集超過100萬噸二氧化碳，碳捕捉率為90%，但由於設備限制、胺溶劑降解與燃煤組成等缺陷造成最終機組實際捕捉約80萬噸二氧化碳，碳捕捉率70% (SaskPower., 2024)。



圖3.加拿大Boundary Dam發電廠 (照片:SaskPower)

1.4 化學吸收劑

燃燒後二氧化碳捕捉及封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 中最廣泛運用的方法是化學吸收技術，例如單乙醇胺 (Monoethanolamine, MEA)。MEA被認為是工業製程中最經濟實惠的吸收溶劑、反應速率快且在低壓環境下也有良好的吸收效率 (Yulia et al., 2021)，但化學吸收技術有一定的侷限性，如溶劑易揮發、降解、再生所需能量較高且有腐蝕性使設備受損，此外有機溶劑具毒性及揮發性，對環境相對不友善 (Jiang et al., 2013)。

此外，MEA主要由氨氣 (Ammonia, NH_3) 與環氧乙烷 (Ethylene Oxide, EO) 反應生成，如圖4，而氨氣與環氧乙烷製造過程都會產生二氧化碳洩漏，並耗費許多能源。目前大部分製作氨氣的原料為化石燃料，並且有80%使用蒸汽重整 (steam reforming) 方法製作。在蒸汽重整的過程，不僅需要燃燒天然氣或其他燃料以加熱，反應本身也會產生1.15-1.40kg/kg NH_3 的二氧化碳。雖然產生的二氧化碳可再利用於肥料製作等領域，但製作每噸氨氣仍會排放出500公斤二氧化碳，而環氧乙烷本身活性高且具有毒性，因此為危險物質。並且，環氧乙烷由乙烯經氧化反應生成，過程中，不僅會在部分氧化情況下產生環氧乙烷，也會在完全燃燒時產生二氧化碳 (Luis., 2016)。

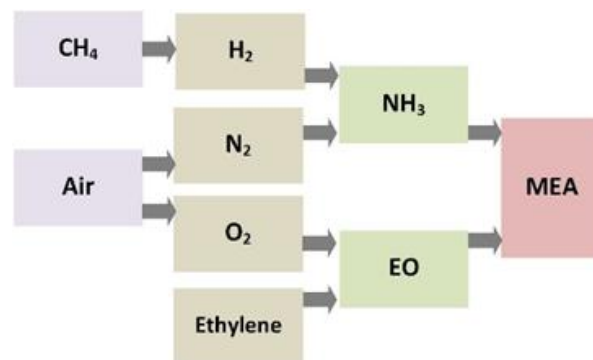


圖4.MEA主要製造來源 (Luis., 2016)

1.5 活性碳吸附劑

活性碳為具高比表面積的多孔結構材質，因此對於小分子擁有良好吸附能力，可應用於純化液體與氣體 (Sing, 1985)，例如廢水處理、飲用水淨化、食品應用的脫色精煉、廢氣處理、有機溶劑吸附與回收等 (江財榮，2018)。活性碳的物理吸附主要是透過分子間的凡德瓦力，包含倫敦分散力與靜電吸附。由於物理吸附所需活化能較低，因此吸附速率快，並且其為可逆反應，易於脫附 (林景正，2007)。

根據International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)，活性碳依孔徑可分為微孔、中孔、大孔，孔徑愈小，比表面積愈高。微孔孔徑小於2 nm，比表面積為100-1000 (m²/g)，中孔孔徑介於2-50 nm，比表面積為10-100 (m²/g)，大孔孔徑超過50 nm，比表面積僅有0.5-2 (m²/g) (Ruthven, 1984)。而在吸附時，由於分子篩效應 (molecular sieving effect)，只有動力學直徑 (kinetic diameter) 小於活性碳的氣體才能通過 (Li et al., 2021 & Abnisa et al., 2014)。分子通過後，會以物理或化學鍵結吸附於活性碳 (Patel et al., 2024)，因此活性碳在吸附過程具有選擇性。

目前已有許多使用活性碳進行碳捕捉的研究，例如Putri團隊利用活性碳進行二氧化碳吸附實驗，藉由改變活化劑濃度以及活化溫度，改變活性碳的表面積以及孔洞數量。研究結果中，活性碳最高表面積高達1403 m²/g，並且此時孔洞體積為0.9 cm³/g，孔徑為1.11 nm，代表活性碳具有微孔。而此研究也說明，活性碳微孔數量愈多，吸附效果愈好，在此研究結果中，最高可吸附5.16 mmol/g的二氧化碳 (Putri, 2024)。

1.6 解決方法

淨碳吉研發之活性碳吸附劑具有高比表面積與高選擇性，可以有效捕捉二氧化碳，製造過程環境友善並且易再生，有助於達成淨零碳排、減緩氣候變遷。

二、 研究歷程

2.1 動機與目的

在現今環境中，燃煤電廠燃燒後所產生煙氣中所含的二氧化碳佔能源年度排放量的73%以上 (Zafanelli et al.,2022)。台灣因應全球暖化所提出2050淨零碳排以及淨零排放路徑112-115年綱要計畫，其中包含電力及非電力能源去碳化、徵收碳稅、碳足跡及產品標示管理 (行政院，2024)。為達到淨零碳排的目標，研究發現CCS在減少碳排放的部份具有優勢。為了簡單化CCS技術以及達到更好的效益，世人發明出活性碳、沸石和金屬有機框架等相關的產品，而活性碳會被大多數人使用是因為活性碳相比沸石和金屬有機框架 (Metal Organic Frameworks, MOF) 的材料成本較低以及對濕度的敏感性較差，這可使活性碳在處理濕度較高的氣體來的更加優秀，沸石和MOF具有高吸附能力，以至於它們遇到濕度較高的情況下，會迅速飽和，回收率會大量下降甚至失去其吸附能力 (Pastor et al., 2024)。而活性碳除了材料成本較低以及對濕度的敏感性較差之外，它還有許多優點，包括其多孔性、多功能吸附能力、高表面積、良好的穩定性和價格低廉等 (Fonseca-Bermúdez et al., 2024)。因此本研究欲合成高比表面積及高選擇性吸附二氧化碳之活性碳，可用於工廠煙道氣中低二氧化碳濃度的捕捉及回收。

2.2 發展歷程

台灣的機車持有率為全球之冠，根據交通部統計查詢網資料顯示2024年11月共14,654,033輛機車 (重型與輕型機車合計)，每一百人就持有99.7輛，而自用汽車8,678,153輛，每一百人持有37.1輛 (交通部統計查詢網，2024)。汽、機車數量逐年遞增使得污染影響加遽，依照排放係數計算，機車行駛一公里可排0.06公斤二氧化碳當量 (CO₂e)，而汽車行駛一公里排放0.24公斤二氧化碳當量 (CO₂e)，為了降低碳排量除了改善內燃機之空燃比外，還可以在尾氣端加裝濾煙器 (圖5)，濾煙器分為兩大部分，車輛廢氣先進入柴油氧化催化器 (Diesel Oxidation Catalyst, DOC) 使一氧化碳和碳氫化合物氧化催化為二氧化碳及水，第二部分柴油引擎顆粒過濾器 (Diesel Particulate Filter, DPF) 通常是細孔蜂窩結構及內部多孔壁，粒狀物通過後過濾效率接近98% (Mohankumar & Senthilkumar,. 2017)，最終尾氣只會排出無污染之氮氣及水。

車輛之濾煙器設備DPF可將二氧化碳捕捉後固定，分析其結構與材質後得知，結構似壁流式載體，材質為陶瓷或碳化合物具有多孔且孔隙率高，有較佳的吸附與攔截效果。本研究期望透過DPF設備延伸至大型工廠煙道氣中運用，因此開始研發擁有高碳含量之樹脂，根據Chen團隊所提出的低聚合物配方進行改良 (Chen et al., 2021)，從中減少藥劑種類與反應程序，而透過前人實驗得知含碳固體吸附劑以蜂巢狀結構能吸附最多的二氧化碳吸附量，如表1，故將碳質材料與蜂巢結構兩種特性結合，欲創造出在大氣壓力、低二氧化碳分壓及溫度下就能順利吸附二氧化碳之固體吸附劑，以達到未來在工廠煙道氣中回收氣體再利用。

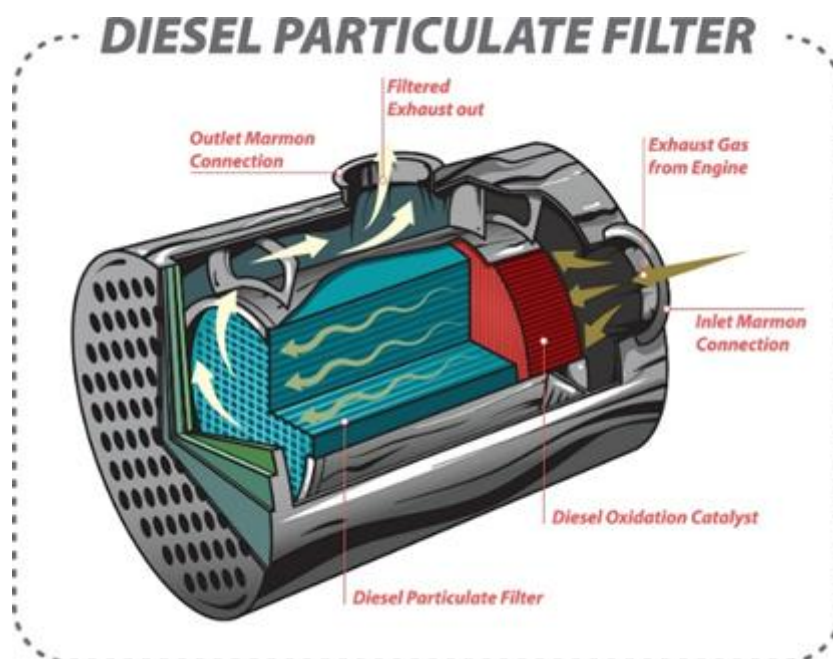


圖5車輛濾煙器 (BOSTECHauto)

表 1.含碳固體吸附劑之吸附效能差異

形貌/名稱	CO ₂ 吸附條件	CO ₂ 吸附容量(mmol/g)	文獻
蜂巢狀/2-S3DPP	1 bar, 50°C, 100% CO ₂	3.0	(Jivraakh et al., 2024)
中空纖維/MFC-900	1 bar, 50°C, 100% CO ₂	1.5	(Shi et al.,2024)
微米球/CMS	1 bar, 50°C, 100% CO ₂	0.82	(Ojeda-López et al., 2022)

三、 作品說明圖

3.1 建立模型

利用MSLattice模型建模，調整形狀 (Cuboid、Cylindrical、Spherical)、結構、尺寸、晶胞大小、密度等，為挑選符合管柱且良好體積比之模型結構，本研究選擇Cylindrical及三週期最小表面 (Triply Periodic Minimal Surface, TPMS) 之Gyroid結構目的為貼合商用吸附的圓管柱之設計，如圖6，其晶格可提供每單位體積最高的比表面積、不間斷的光滑曲線及最小壓降 (Jivrakh et al., 2024)。將繪製模型儲存成標準曲面細分語言 (Standard Tessellation Language, stl) 檔案後匯入Chitubox pro 進行切片，使用4K高解析度 (3,840 x 2,160像素) 之3D列印機台，可藉由405 nm波段光束逐層固化樹脂，使材料有高可控性及精細度。

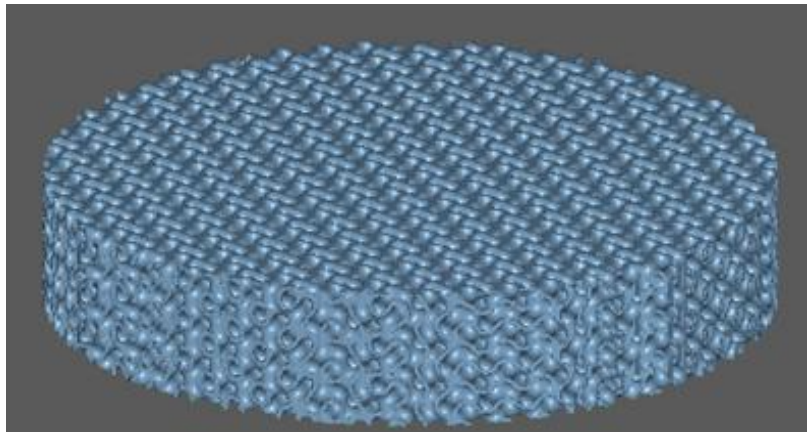


圖6.本研究之列印模型圖

3.2 MRPP光敏樹脂

間苯二酚溶於蒸餾水中，隨後加入六亞甲基四胺(間苯二酚的25wt%)均於混合後，加熱攪拌溶液，此時溶液合成為間苯二酚-甲醛樹脂(Resorcinol-formaldehyde resin, RF)。接著加入甲基丙烯酸和對苯二酚，持續加熱攪拌，生成間苯二酚-甲醛樹脂丙烯酸酯(Methacrylate Resorcinol Phenolic Polycondensate, MRPP)預聚物。最後將MRPP預聚物、單體HDDA及光起始劑TPO均勻混合，得到MRPP光敏樹脂，簡稱為代號M，如圖7。

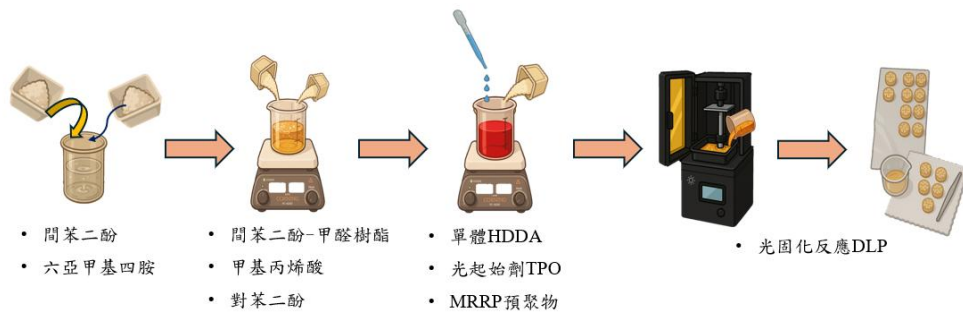


圖7.MRPP光敏樹脂合成流程圖

3.3 活性碳製備

MRPP光敏樹脂倒入3D列印機台列印及清潔完畢後，使用鍛燒管式爐以物理方式 N_2 碳化，聚合物在高溫且缺氧環境下熱裂解，其非碳元素會以揮發性物質或焦油去除，此時聚合物具多孔性質但由於產生之副產物可能阻塞孔隙，故吸附能力不高，需要再進一步 CO_2 活化，去除孔洞中碳氫化合物使比表面積充滿奈米孔隙，此步驟可讓材料提升孔隙率及比表面積，如圖8，命名方式:M-CX，X為 CO_2 活化時間，以小時為單位。

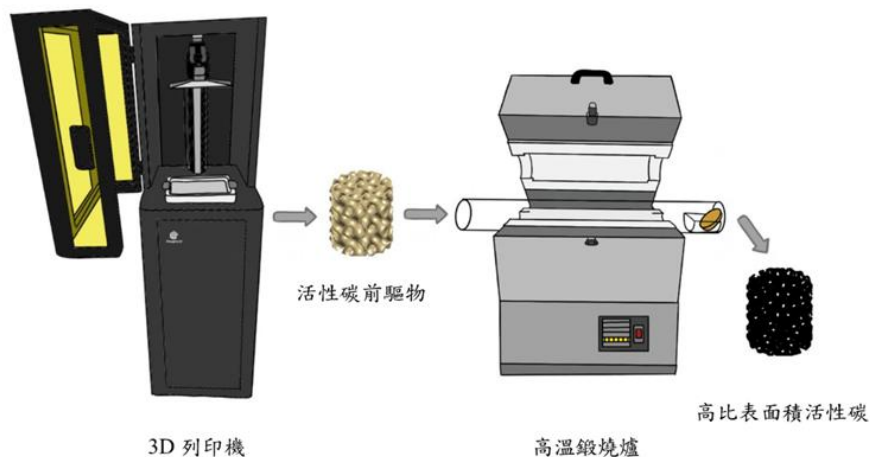


圖8.活性碳製備

四、 預期成果及可行性評估

4.1 預期成果

在前導實驗中，先製成直徑及高度各為1公分之活性碳，在大氣壓下以100% CO₂進行吸附實驗，如圖9(a)，M-C3吸附容量在30°C時高達2.26 mmol/g 而50°C時可達1.63 mmol/g，證明活性碳確實具有吸附能力且吸附過程為放熱反應。圖9(b)，模擬工廠煙道氣環境進行測試，在大氣壓下以15% CO₂/N₂氣體透過不同吸附溫度觀察到吸附容量趨勢與100% CO₂相似，其中M-C3吸附溫度50°C時吸附容量0.35 mmol/g而相同條件下市售商業顆粒活性碳 (Commerical Granular Activated Carbon, CGAC) 僅 0.13 mmol/g。本研究預計將活性碳直徑及高度放大，圖9(c)，使總體積提升53.83倍，故吸附總量也因此提升。

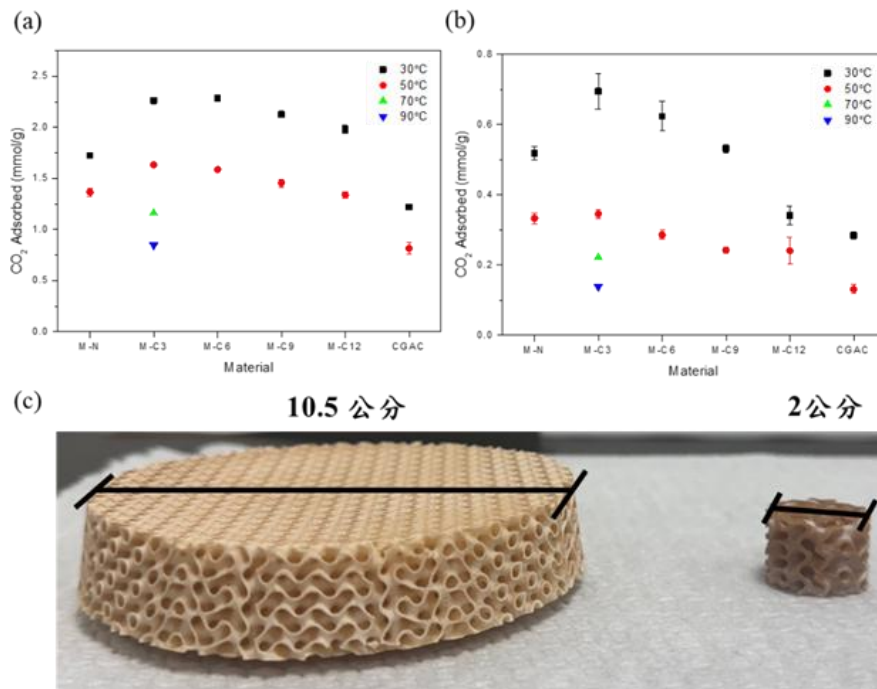


圖9.碳質吸附劑在大氣壓下以不同吸附溫度透過(a) 100% CO₂；(b) 15% CO₂/N₂氣流進行吸附實驗;(c) 不同直徑之預聚物照片

4.2 經濟成本考量

日本北海道縣苫小牧市於2012年至2015年改裝煉油廠的製氫設備預計將產生的高純度二氧化碳注入地下，如圖10之佈局。從2016年4月起開始向苫小牧港的港區海底超過1000公尺的兩種地層注入二氧化碳，在2019年11月22日達成30萬噸灌注目標，同日停止灌注並持續維護設備及監控二氧化碳的遷移、分布。此捕捉系統分為兩階段進行，第一階段低壓閃蒸塔 (Low Pressure Flash Tower, LPFT)，

藉由降低壓力讓70%的二氧化碳從BASF胺基吸收劑釋放，剩餘的30%會到CO₂氣提塔脫附。根據每年捕捉及灌注系統所需能耗進行計算，如表2所示，以台灣電力公司公布之夏季營業用電戶收費標準試算，該CCS計畫於2019年吸收每噸CO₂需花費至少2435.41元(式1、2)，且不含胺基吸收劑購買、耗損更換與設備腐蝕維護等成本。此項技術雖然能捕捉二氧化碳並封存製地層，但需要提前改建設備利用蒸氣重整方法產生較不易控制之氫氣，其副產物二氧化碳雖然濃度高但存在製造風險，吸收溶劑透過化學方法捕捉可能造成溶劑降解與腐蝕性等問題。

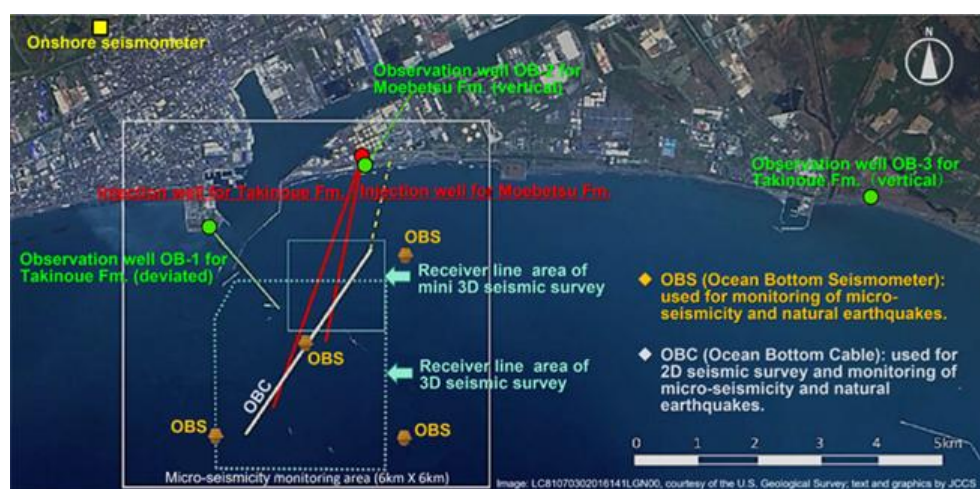


圖10. 苫小牧CCS注射設施及監控系統佈局圖 (Japan CCS Co., Ltd., 2025)

表 2. 苫小牧 CCS 計畫設備能耗 (Japan CCS Co., Ltd., 2020)

	單位	FY2016	FY2017	FY2019	設計目標
CO ₂ 回收	t/h	25.3	24.3	26.4	25.3
再生塔	GJ/t-CO ₂	0.923	0.882	0.915	0.949
幫浦電力	kWh/t	19.8	21.0	18.8	19.2
捕捉能耗	GJ/t-CO ₂	1.20	1.16	1.18	1.22

FY2019 以台電夏季營業用戶標準試算之電費:

$$1.18 \text{ GJ/t-CO}_2 * 277.78 \text{ kWh/GJ}^{\text{註1}} = 327.78 \text{ kWh/t-CO}_2 \text{ (式 1)}$$

$$327.78 \text{ kWh/t-CO}_2 * 7.43 \text{ 元/kWh}^{\text{註2}} = 2435.41 \text{ 元/t-CO}_2 \text{ (式 2)}$$

註 1: 1 GJ = 277.78 kWh

註 2: 每月使用 3,000 度以上之營業用戶，每度電 7.43 元

本研究花費計算，假設一工廠設置 4 座排煙管道(二氧化碳吸附塔)，管道中放置本實驗 M-C3 多孔活性碳材，煙道氣氣體組成為 15% CO₂/N₂，使氣體溫度保持 50°C。實施作業時每次使用 2 座吸附塔，當 M-C3 吸附二氧化碳飽和後開啟加溫再生系統，使 M-C3 再生且純化二氧化碳，同時將煙道氣排至另外 2 座吸附塔，以此循環作業。透過表 3 的設備能耗數據計算出吸附及純化二氧化碳所需電費(式 3~7)，結果得出吸附 1 噸二氧化碳僅需 0.13 元，遠低於苦小牧 CCS 的 2435.41 元/t-CO₂，而純化後二氧化碳則花費 0.30 元/t-CO₂。

表 3.本研究設備能耗

吸附塔	0.77 kW
再生塔	0.77 kW
持溫能耗係數	0.6

每座吸附塔每小時 CO₂ 吸附量: $0.36 \text{ mmol} \times (24 \times 10^6) = 0.38 \text{ t-CO}_2/\text{h}$ (式 3)

吸附 1 噸 CO₂: $\frac{50^\circ\text{C}}{1200^\circ\text{C}} \times 0.6 \times 0.77 \text{ kW} \times \frac{1 \text{ t-CO}_2}{0.38 \text{ t-CO}_2/\text{h}} = 0.051 \text{ kWh/t-CO}_2$ (式 4)

再生 1 噸 CO₂: $\frac{110^\circ\text{C}}{1200^\circ\text{C}} \times 0.6 \times 0.77 \text{ kW} \times \frac{1 \text{ t-CO}_2}{0.38 \text{ t-CO}_2/\text{h}} = 0.111 \text{ kWh/t-CO}_2$ (式 5)

以台電夏季營業用戶標準若每月 30 天，一天工作 12 小時，用電度數在 330 度以下，每度電 2.61 元，試算之電費為：

吸附: $0.051 \text{ kWh/t-CO}_2 \times 2.61 \text{ 元/kWh} = 0.13 \text{ 元/t-CO}_2$ (式 6)

再生: $0.111 \text{ kWh/t-CO}_2 \times 2.61 \text{ 元/kWh} = 0.30 \text{ 元/t-CO}_2$ (式 7)

吸附1噸CO₂後再生: 0.43 元/t- CO₂ (式8)

五、 市場潛力

5.1 SWOT+USED分析

本研究進行SWOT分析，結果如圖11所示。高性能之優勢 (Strengths)，為藉由材料結構特性、吸附/脫附能耗低及可長期循環使用。劣勢 (Weaknesses) 是吸附容量並未達業界最高及再生需溫控設施造成限制。目前碳費制度、綠色材料趨勢和可應用延伸創造出市場擴展之機會(Opportunities)。威脅 (Threats) 為外部風險因素，由於市場競爭激烈和3D列印有技術門檻。

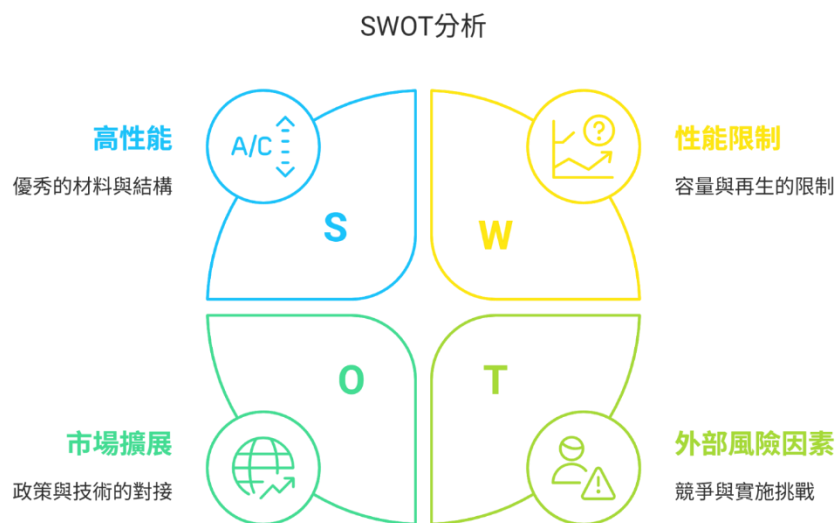


圖11.本研究之SWOT分析

SWOT分析延伸後，可以得到USED (Use, Stop, Exploit and Defend) 之分析及應用，如圖12。活用優勢 (Use):(1)推廣本研究3D列印Gyroid結構於吸附系統中，具有高比表面積、連續孔道、可客製設計的幾何優勢，在不同CO₂濃度與濕度條件下仍表現穩定，適用於工廠、實驗室或移動載具。(2)低能耗及應用拓展，每噸CO₂僅需0.43元吸附與純化，能作為政策輔導對象、示範工廠或碳費減免的技術選項。停止劣勢 (Stop):減少僅用溫度進行再生活化的方案依賴。善用機會 (Exploit):(1)碳費政策，與工業局、環境部合作試點推行，結合碳權市場（如碳信用交易），提升研究的政策連結度。(2)拓展應用，利用活性碳對濕度穩定的特性，導入都市空污治理、新建築碳排管理或機車濾煙器升級。防禦威脅 (Defend):(1)定位差異，與現有商業材料及技術進行比較。(2)技術移轉，設計模組化設備或簡化製程，擴大應用族群。



圖12.本研究之USED分析

5.2 STP分析

STP分析 (Segmentation, Targeting and Positioning)，如圖13。首先，以地理為市場區隔 (Segmentation)，挑選工業化程度高、碳排壓力大的地區，如台灣、日本、韓國、中國沿海、歐洲碳費區。目標市場 (Targeting) 設定中大型之高碳排工業廠房，包括石化、火力發電、水泥、鋼鐵等產業，特徵是已有排放紀錄、具碳費壓力、可部署低成本CCS替代方案。統整本研究之活性碳優勢，具備低能耗、易回收、可模組化設置等特點，能降低碳費支出。最終，市場定位 (Positioning)，本研究之活性碳是專為高碳排工業設計的低成本、低能耗、易再生的CO₂捕捉解決方案，能有效在潮濕或低壓環境中穩定工作，協助企業邁向碳中和。

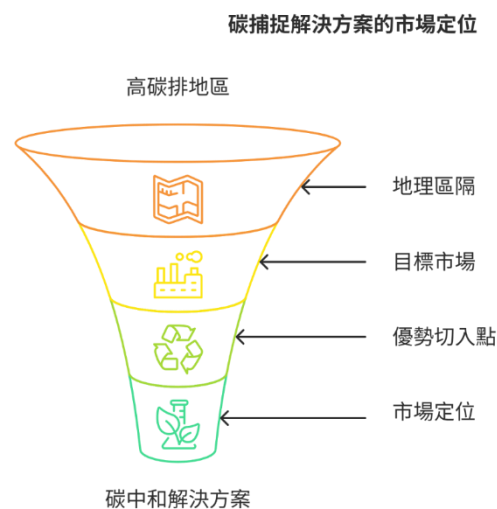


圖13.本研究之STP分析

六、工作分配

吳翊寧	作品說明書、海報、實驗操作
楊思柔	作品說明書、海報
張閔崙	作品說明書、海報、實驗操作

參考資料

- [1] 鄒昇和 (2024)。利用3D列印技術製備高表面積結構型活性碳塊材吸附二氧化碳。國立台灣大學碩士論文。
- [2] Kabir, M., Habiba, U. E., Khan, W., Shah, A., Rahim, S., Patricio, R., ... & Shafiq, M. (2023). Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on environment in 21st century; a mini review. *Journal of King Saud University-Science*, 35(5), 102693.
- [3] National Oceanic and Atmospheric Administration. (2024). <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- [4] Lim, S. G., Tay, Y. W. D., Paul, S. C., Lee, J., Amr, I. T., Fadhel, B. A., ... & Tan, M. J. (2024). Carbon capture and sequestration with in-situ CO₂ and steam integrated 3D concrete printing. *Carbon Capture Science & Technology*, 13, 100306.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3–32). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- [6] 環境部氣候變遷署。(引用日期:2024年12月16日)。碳費專區。<https://www.cca.gov.tw/affairs/carbon-fee-fund/2301.html>
- [7] IEA, U. (2013). *Technology roadmap. Carbon capture and storage*, Paris, France, 59.
- [8] Yang, L., Zhang, J., Li, X., Zhu, N., & Liu, Y. (2024). The moderating effect of emission reduction policies on CCS mitigation efficiency. *Applied Energy*, 376, 124303.
- [9] Moreno, D., Bang, A., Nielsen, S., & Thellufsen, J. Z. (2024). Strategic management of CO₂: A scalable model for CCS in decarbonised societies. *Journal of Environmental Management*, 368, 122175.
- [10] Jaffar, M. M., Rolfe, A., Brandoni, C., Martinez, J., Snape, C., Kaldis, S., ... & Huang, Y. (2024). A technical and environmental comparison of novel silica PEI adsorbent-based and conventional MEA-based CO₂ capture technologies in the selected cement plant. *Carbon Capture Science & Technology*, 10, 100179.

- [11] Allah, F. U. M., da Silva Marques, A., & Carvalho, M. (2024). Current status, challenges and future prospects of carbon capture and storage (CCS) for thermal power plants in Brazil. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 136, 104198.
- [12] Lee, Y., Oh, S., Mun, H., & Lee, I. (2024). Carbon-neutral design of ammonia synthesis process using oxy-fuel combustion-based carbon capture: Carbon-techno-economic comparison. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*.
- [13] Hasan, H. F., Al-Sudani, F. T., Albayati, T. M., Salih, I. K., Hharah, H. N., Majdi, H. S., ... & Gheni, S. A. (2024). Solid adsorbent material: A review on trends of post-combustion CO₂ capture. *Process Safety and Environmental Protection*, 182, 975-988.
- [14] Stéphenne, K. (2014). Start-up of world's first commercial post-combustion coal fired CCS project: contribution of Shell Cansolv to SaskPower Boundary Dam ICCS project. *Energy Procedia*, 63, 6106-6110.
- [15] SaskPower. BD3 Status Update: Q3 2024. (2024) <https://www.saskpower.com/about-us/our-company/blog/2024/bd3-status-update-q3-2024>
- [16] Yulia, F., Sofianita, R., Prayogo, K., & Nasruddin, N. (2021). Optimization of post combustion CO₂ absorption system monoethanolamine (MEA) based for 320 MW coal-fired power plant application–Exergy and exergoenvironmental analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101093.
- [17] Jiang, B., Wang, X., Gray, M. L., Duan, Y., Luebke, D., & Li, B. (2013). Development of amino acid and amino acid-complex based solid sorbents for CO₂ capture. *Applied energy*, 109, 112-118.
- [18] Luis, P. (2016). Use of monoethanolamine (MEA) for CO₂ capture in a global scenario: Consequences and alternatives. *Desalination*, 380, 93-99.
- [19] Sing, K. S. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). *Pure and applied chemistry*, 57(4), 603-619.
- [20] 江財榮. (2018). 以國內外椰殼製備具中孔性高比表面積活性碳之程序技術. 屏東科技大學環境工程與科學系所學位論文, 2018, 1-109.
- [21] 林景正. (2007). 「活性碳的碳化和活化機制介紹」, 化工技術, 第174期, 第179-197頁

- [22] Ruthven, D. M. (1984). Principles of adsorption and adsorption processes. John Wiley & Sons.
- [23] Li, J., Zhu, X., Li, Y., Tong, Y. W., Ok, Y. S., & Wang, X. (2021). Multi-task prediction and optimization of hydrochar properties from high-moisture municipal solid waste: Application of machine learning on waste-to-resource. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123928.
- [24] Abnisa, F., & Daud, W. M. A. W. (2014). A review on co-pyrolysis of biomass: an optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil. *Energy Conversion and Management*, 87, 71-85.
- [25] Patel, H., Mohanty, A., & Misra, M. (2024). Post-combustion CO₂ capture using biomass based activated porous carbon: Latest advances in synthesis protocol and economics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114484.
- [26] Putri, A. M. H., Ramadhoni, B. F., Radias, M. S. H., Riyadi, F. A., Alam, M. Z., & Muharam, Y. (2024). Performance of activated carbon derived from tea twigs for carbon dioxide adsorption. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 100440.
- [27] Zafanelli, L. F., Henrique, A., Steldinger, H., de Tuesta, J. L. D., Gläsel, J., Rodrigues, A. E., ... & Silva, J. A. (2022). 3D-printed activated carbon for post-combustion CO₂ capture. *Microporous and Mesoporous Materials*, 335, 111818.
- [28] 行政院 . (2024). 臺灣 2050 淨零排放 .
<https://www.ey.gov.tw/Page/5A8A0CB5B41DA11E/7a65a06e-3f71-4c68-b368-85549fbca5d1#:~:text=>
- [29] Pastor, R. L., Pinna-Hernández, M. G., Molina, J. S., & Fernández, F. A. (2024). Influence of the moisture and ash content in flue gases on the performance of adsorption processes using activated carbons to capture the CO₂ for reuse in greenhouses. *Heliyon*.
- [30] Fonseca-Bermúdez, Ó. J., Giraldo, L., Sierra-Ramírez, R., Serafin, J., Dziejarski, B., Bonillo, M. G., ... & Moreno-Piraján, J. C. (2024). Cashew nut shell biomass: A source for high-performance CO₂/CH₄ adsorption in activated carbon. *Journal of CO₂ Utilization*, 83, 102799.
- [31] 交通部統計查詢網，機動車輛登記數，(引用日期:2024年12月10日)
<https://stat.motc.gov.tw/mocdb/stmain.jsp?sys=220&ym=8101&ytm=11311&kind=21&type=1&funid=b330101&cycle=41&outmode=0&compmode=0&outkind=1&fldlst=110111101101111101111011000010011&rdr=tmtWqkm0>

- [32] BOSTECHauto. (2021). What Is a Diesel Particulate Filter (DPF)? When to Change and How to Clean. <https://bostechauto.com/blog/what-is-a-diesel-particulate-filter-dpf-when-to-change-and-how-to-clean/>
- [33] Mohankumar, S., & Senthilkumar, P. (2017). Particulate matter formation and its control methodologies for diesel engine: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1227-1238.
- [34] Chen, S., Luo, Y., Xu, Y., Zheng, Y., Liu, X., Wang, R., ... & Zhuo, D. (2021). Synthesis and characterization of cardanol-based methacrylate oligomers for three-dimensional printing resins. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(48), 16316-16327.
- [35] Jivrakh, K. B., Kuppireddy, S., Taher, S. E., Polychronopoulou, K., Al-Rub, R. A., Alamoodi, N., & Karanikolos, G. N. (2024). Zeolite-coated 3D-printed gyroid scaffolds for carbon dioxide adsorption. *Separation and Purification Technology*, 346, 127523.
- [36] Shi, L., Liao, K. Y., Dong, Y. H., Wang, Y. A., Zhou, Y., Yi, X. G., ... & Tao, D. J. (2024). Hollow branched fiber hierarchical porous carbon as recyclable adsorbents and catalysts for efficient CO₂ capture and conversion. *Sustainable Materials and Technologies*, 40, e00880.
- [37] Ojeda-López, R., Vilarrasa-García, E., Azevedo, D. C., Felipe, C., Cecilia, J. A., & Rodríguez-Castellón, E. (2022). CO₂ selectivity in CO₂: CH₄ and CO₂: N₂ mixtures on carbon microfibers (CMFs) and carbon microspheres (CMSs). *Fuel*, 324, 124242.
- [38] Jivrakh, K. B., Varghese, A. M., Ehrling, S., Kuppireddy, S., Polychronopoulou, K., Al-Rub, R. K. A., ... & Karanikolos, G. N. (2024). 3D-Printed zeolite 13X gyroid monolith adsorbents for CO₂ capture. *Chemical Engineering Journal*, 497, 154674.